

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Čadež

Zagreb, 2016. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Razrada metode umjeravanja promjera
kontrolnih prstena u Nacionalnom laboratoriju za
duljinu**

Student: Luka Čadež

0035184224

Mentor: Doc.dr.sc. Gorana Baršić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Veliku zahvalnost, u prvom redu, dugujem svojoj mentorici doc.dr.sc. Gorani Baršić i dr.sc. Vedranu Šimunoviću koji su mi omogućili svu potrebnu opremu i pomagali svojim savjetima pri izradi ovog diplomskog rada i što su uvijek imali strpljenja i vremena za moje brojne upite.

Također, zahvaljujem tehničarima Josipu Smoljiću i Tomislavu Habeku na pomoći kod mjerenja u laboratoriju.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima i sestri Teni, koji su uvijek bili TU, uz mene, bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

Veliko HVALA svima!

Luka Čadež



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Čadež** Mat. br.: 0035184224

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razrada metode umjeravanja promjera kontrolnih prstena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of method for diameter calibration of ring gauges at National Laboratory for Length**

Opis zadatka:

Nacionalni laboratorij za duljinu akreditiran je za postupak umjeravanja kontrolnih prstena nazivnih promjera od 8 mm do 150 mm. Sadašnja metoda umjeravanja temelji se na usporedbi kontrolnog prstena s referentnim prstenom. Korištenjem ove metode, prstene promjera manjih od 8 mm nije moguće umjeravati. Cilj rada je razraditi metodu umjeravanja koja ne zahtjeva prijenos mjere s referentnog prstena. Na taj način omogućilo bi se i umjeravanje kontrolnih prstena promjera manjih od 8 mm u Nacionalnom laboratoriju za duljinu. U okviru diplomskog zadatka student ima sljedeće zadatke:

1. Dati pregled metoda umjeravanja promjera kontrolnih prstena.
2. Razraditi mjernu metodu za umjeravanje kontrolnih prstena koja omogućuje umjeravanje kontrolnih prstena promjera do 8 mm.
3. Procijeniti mjernu nesigurnost nove metode.
4. Provesti umjeravanje kontrolnih prstena prema postojećem postupku Nacionalnog laboratorija za duljinu i prema novoj mjernoj metodi.
5. Analizirati dobivene rezultate mjerenja, te donijeti zaključak o prednostima i nedostacima nove metode.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Gorana Baršić

Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

Predvideni datum obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

1	Uvod	1
1.1	Sljedivost i umjeravanje	2
1.2	Mjerila za mjerenje unutarnjih promjera [1]	7
1.3	Mjerni prsteni	12
1.4	Usporedba mjeriteljskih sposobnosti Nacionalnih instituta za mjerenje duljine unutarnjeg promjera [2]	16
2	Mjerne metode duljine unutarnjeg promjera prstena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu	17
2.1.	Univerzalni mjerni uređaj DMS 680 [3]	18
2.1.1.	Granična pogreška uređaja	19
2.1.2.	Tehnička specifikacija	20
2.1.3.	Kompozicijska struktura	20
2.2.	Mjerna metoda duljine unutarnjeg promjera prstena s kontaktnim čeljustima	23
2.2.1.	Mjerna nesigurnost mjerne metode sa kontaktnim čeljustima [4]	33
2.3.	Mjerna metoda sa ticalom i referentnim prstenom	35
2.3.1.	Mjerna nesigurnost metode s ticalom i referentnim prstenom [5]	44
2.4.	Mjerna metoda sa ticalom i planparalelnom graničnom mjerkom	50
2.4.1.	Mjerna nesigurnost metode sa ticalom i planparalelnom graničnom mjerkom	55
3	Usporedba rezultata mjerenja kontrolnog prstena Ø15,997 mm	62
4	Zaključak	66
5	Literatura	68
6	Prilog	68

Popis slika

Slika 1. Metode mjerenja unutarnjeg promjera prstena	2
Slika 2. Lanac sljedivosti	4
Slika 3. Hijerarhija etalona	5
Slika 4. Hijerarhija etalona	6
Slika 5. Klasično pomično mjerilo	7
Slika 6. Digitalno pomično mjerilo sa keramičkim dodirnim čeljustima	8
Slika 7. Klasični mikrometar za unutarnja mjerenja - 2. izvedba čeljusti	8
Slika 8. Digitalni mikrometar	9
Slika 9. Set trokrakih mikrometara sa pripadajućim komponentama	9
Slika 10. Digitalni trokraki mikrometar	10
Slika 11. Subito za mjerenje vrlo malih provrta	10
Slika 12. Mjerilo za male promjere s iglom	11
Slika 13. Kontrolni prsten	12
Slika 14. Referentni prsten	12
Slika 15. Kontrolni prsteni	13
Slika 16. Referentni prsteni Ø13,9983 mm	14
Slika 17. Referentni prsteni Ø50,0004 mm	14
Slika 18. Osiguravanje sljedivosti za kontrolne prstene	15
Slika 19. Metode mjerenja duljine unutarnjeg promjera prstena	17
Slika 20. Univerzalni mjerni uređaj DMS 680	18
Slika 21. Prikaz sučelja računalnog programa	19
Slika 22. DMS 680	21
Slika 23. Glava	21
Slika 24. Mala glava	22
Slika 25. Radni stol	22
Slika 26. Referentni mjerni prsten Ø13,9991 mm	24
Slika 27. Kontrolni mjerni prsten Ø15,997 mm	24
Slika 28. Male kontaktne čeljusti	24
Slika 29. Paralelni nosači	25
Slika 30. Digitalni termometar sa sondom	25
Slika 31. Stavljanje dva paralelna nosača na radni stol	27

Slika 32. Postavljanje kontaktnih čeljusti	27
Slika 33. Probno spajanje čeljusti	28
Slika 34. Pričvršćivanje ušice	28
Slika 35. Postavljanje i učvršćivanje referentnog prstena	29
Slika 36. Mogućnost sudara	30
Slika 37. Traženje prekretno točke	31
Slika 38. Mjerenje kontrolnog prstena	32
Slika 39. Ticalo	35
Slika 40. Mjerni sustav ticala	36
Slika 41. Digitalni komparator TESA TT 200	36
Slika 42. Nepomični stolić	37
Slika 43. Nepomični radni stol	39
Slika 44. Postavljeni mjerni sustav ticala	39
Slika 45. Postavljanje i učvršćivanje referentnog prstena	40
Slika 46. Pozicionirano ticalo iznad unutarnjeg promjera referentnog prstena	41
Slika 47. Pozicija ticala unutar referentnog prstena	41
Slika 48. Ticalo u dodiru sa unutarnjom stranom referentnog prstena	42
Slika 49. Traženje prekretno točke	42
Slika 50. Planparalelna granična mjerka nazivne duljine 16 mm	50
Slika 51. Malo rotacijsko postolje	51
Slika 52. Pričvršćena planparalelna granična mjerka na malo rotacijsko postolje	52
Slika 53. Ticalo u dodiru sa planparalelnom graničnom mjerkom	52
Slika 54. Pozicioniranje planparalelne granične mjerke	53
Slika 55. Translacija ticala	54
Slika 56. Ticalo u poziciji za uzimanje mjere	55
Slika 57. Dijagram Presjek I / Razina 1-1	64
Slika 58. Dijagram Presjek I / Razina 2-2	64
Slika 59. Dijagram Presjek I / Razina 3-3	65
Slika 60. Dijagram Presjek II / Razina 1-1	65
Slika 61. Dijagram Presjek II / Razina 2-2	65
Slika 62. Dijagram Presjek II / Razina 3-3	66

Popis tablica

Tablica 1. Usporedba CMC-a po Nacionalnim institutima za mjerenje duljine	16
Tablica 2. Tehnička specifikacija	20
Tablica 3. Područje primjene.....	20
Tablica 4. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja.....	34
Tablica 5. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja.....	48
Tablica 6. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja.....	60
Tablica 7. Usporedba rezultata mjerenja kontrolnog prstena Ø15,997 mm	63

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
d_x	mm	stvarni promjer kontrolnog prstena na temperaturi 20 °C
d_{ref}	mm	promjer referentnog prstena na referentnoj temperaturi
Δl	mm	izmjerena razlika promjera kontrolnog i referentnog prstena
δ_{li}	μm	korekcija zbog pogreške pokazivanja mjernog uređaja
δ_{lt}	μm	korekcija zbog utjecaja temperature
δ_{lp}	μm	korekcija zbog nepodešenosti suosnosti mjernih ticala i pravca mjerenja
δ_{lE}	μm	korekcija uslijed razlike u elastičnoj deformaciji kontrolnog i referentnog prstena
δ_{lA}	μm	korekcija zbog utjecaja Abbeove pogreške
α_X	1/°C	koeficijent temperaturnog rastezanja kontrolnog prstena
α_{ref}	1/°C	koeficijent temperaturnog rastezanja referentnog prstena
α_R	1/°C	koeficijent temperaturnog rastezanja mjerne skale uređaja
Δt_A	°C	odstupanje temperature okoline od referentne temperature
δ_{X_s}	μm	greška zbog odstupanja temperature kontrolnog prstena od temperature okoline
δ_{lref}	μm	greška zbog odstupanja temperature referentnog prstena od temperature okoline
δ_{lR}	μm	greška zbog odstupanja temperature mjerne skale uređaja od temperature okoline
$T_{ref.P.}$	°C	temperatura referentnog prstena
$T_{kon.P.}$	°C	temperatura kontrolnog prstena
$\delta_{\Delta T,l}$	μm	korekcija zbog odstupanja u temp. od ±0,1 °C i duljini od 20mm između prstena
$\Delta T_{0,1}$	°C	razlika u temperaturi od ±0,1 °C između prstena
d_p	mm	izmjereni promjer kontrolnog prstena
d_r	mm	izmjereni promjer kontrolnog prstena
ΔT	°C	odstupanje temperature okoline od referentne temperature 20 °C, ($\Delta T = \pm 0,5$ °C)
δ_{Nr}	μm	korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja referentnog prstena

δ_{Np}	μm	korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja kontrolnog prstena
δ_{PTr}	μm	korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretno točke ref. prstena
δ_{PTp}	μm	korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretno točke k. prstena
δ_{OTr}	μm	korekcija zbog odstupanja odklona ticala kod referentnog prstena
δ_{OTp}	μm	korekcija zbog odstupanja odklona ticala kod kontrolnog prstena
$\delta_{\Delta T, l}$	μm	korekcija zbog odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C i duljini od 20mm između prstena
$u(d_x)$	μm	mjerna nesigurnost stvarnog promjera kontrolnog prstena
$u(d_{ref})$	μm	mjerna nesigurnost referentnog prstena
$u(d_p)$	μm	mjerna nesigurnost izmjerenog promjera kontrolnog prstena
$u(d_r)$	μm	mjerna nesigurnost izmjerenog promjera referentnog prstena
$u(\Delta T)$	μm	mjerna nesigurnost utjecaja temperature
$u(\delta_N)$	μm	mjerna nesigurnost procesa niveliranja
$u(\delta_{PT})$	μm	mjerna nesigurnost traženja prekretno točke
$u(\delta_{OT})$	μm	mjerna nesigurnost odklona ticala
$u(\delta_{\Delta T, l})$	μm	mjerna nesigurnost odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C između prstena
C_i	/	koeficijent osjetljivosti
$d_{xt, i}$	mm	promjer kontrolnog prstena izmjeren odgovarajućom metodom sa ticalom
$d_{xk, i}$	mm	promjer kontrolnog prstena izmjeren metodom sa kontaktnim čeljustima
$U(d_{xt})$	mm	mjerna nesigurnost metode sa ticalom
$U(d_{xk})$	mm	mjerna nesigurnost metode sa kontaktnim čeljustima

Sažetak

Tema ovog rada je opis i razrada metoda mjerenja duljine unutarnjeg promjera kontrolnih prstena na univerzalnom uređaju za mjerenje duljine DMS 680 u Nacionalnom laboratoriju za duljinu (u daljnjem tekstu Laboratorij).

Osim opisa mjerenja duljine unutarnjeg promjera prstena klasičnom metodom pomoću kontaktnih čeljusti, opisat će se metoda mjerenja pomoću ticala te nova metoda mjerenja pomoću ticala i planparalelene granične mjerke koja je razvijena u sklopu ovog rada. Nedostatak metode mjerenja kontaktnim čeljustima je taj što se ne mogu umjeravati prsteni unutarnjeg promjera manjeg od 8 mm. Metodom mjerenja ticalom mogu se mjeriti prsteni promjera manjeg od 8 mm, ali ukoliko se za referentni etalon koristi prsten, sljedivost do definicije metra ne može se osigurati unutar Laboratorija.

Naime, u Laboratoriju nije moguće umjeravati promjer kontrolnih i referentnih prstena apsolutnom metodom već se koristi usporedbena metoda prijenosa mjere sa etalonskih prstena. Kako bi se osigurala sljedivost rezultata mjerenja Laboratoriji svake četiri godine umjerava svoje etalonske prstene u jednom od inozemnih mjeriteljskih instituta.

Metodom mjerenja ticalom koja za referentni etalon koristi planparalelnu graničnu mjerku mogu se mjeriti unutarnji promjeri prstena manji od 8 mm, te kako se ne koriste referentni prsteni nema potrebe za vanjskim umjeravanjem, već je sljedivost osigurana preko planparalelnih graničnih mjerki.

Ključne riječi: Umjeravanje etalona duljine, mjerni prsten, referentni prsten, kontrolni prsten, univerzalni uređaj za mjerenje duljine, mjerna nesigurnost, mjerenje ticalom, planparalelna granična mjerka

1 Uvod

Dimenzionalno mjerenje je jedna od aktivnosti koju svakodnevno susrećemo u našem životu, od mjerenja pojedinih predmeta ili prostora čije dimenzije želimo saznati do mjerenja raznih nagiba, kuteva, oblika i slično. Iako se dimenzionalna mjerenja svakodnevno koriste u čitavom nizu područja tehničke struke, često puta se ne vodi računa o pouzdanost mjernih rezultata. Međutim, kada su u pitanju industrijska ili laboratorijska mjerenja mjerni postupci postaju znatno kompleksniji kako bi se osigurali pouzdani i sljedivi rezultati. U današnjim laboratorijima postoje sofisticirani i skupi mjerni uređaji za precizna mjerenja koja se odvijaju u strogo određenim uvjetima, te zahtijevaju adekvatan nadzor i vremenski period potreban za određenu izmjeru.

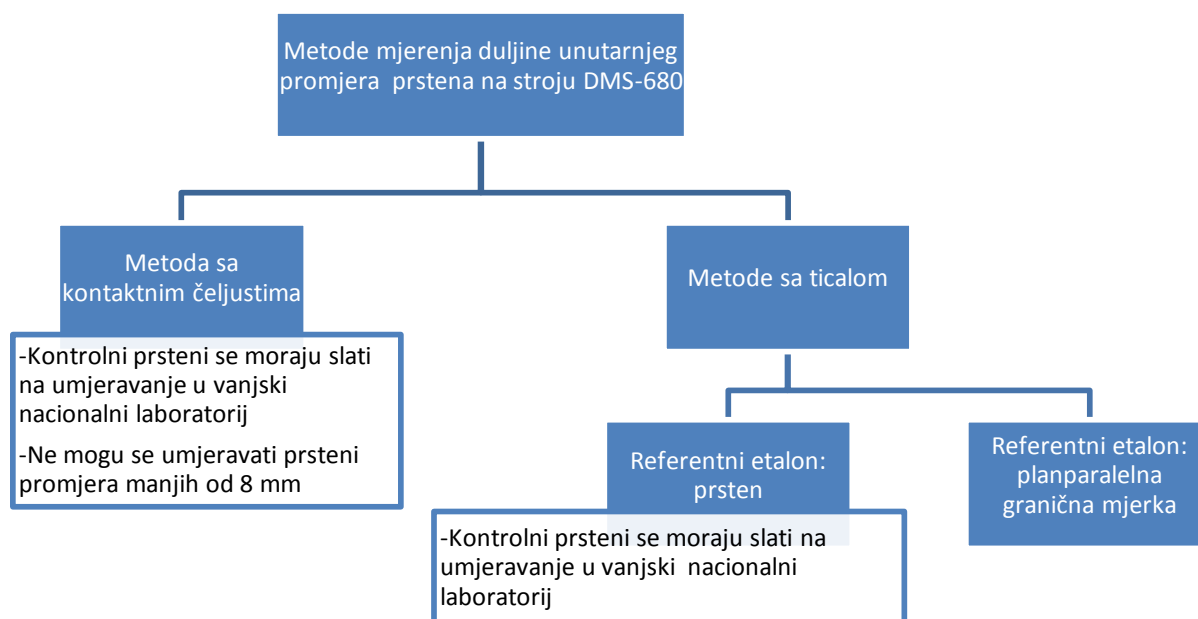
U ovom radu opisati će se mjerenje duljine unutarnjeg promjera prstena na univerzalnom uređaju za mjerenje duljine DMS 680 koji se nalazi u Nacionalni laboratoriju za duljinu.

Osim opisa mjerenja duljine unutarnjeg promjera prstena klasičnom metodom pomoću kontaktnih čeljusti, opisat će se metoda mjerenja pomoću ticala te nova metoda mjerenja pomoću ticala i planparalelene granične mjerke koja je razvijena u sklopu ovog rada.

Nedostatak metode mjerenja kontaktnim čeljustima je taj što se ne mogu umjeravati prsteni unutarnjeg promjera manjeg od 8 mm. Ova metoda je usporedbena metoda, gdje se prenosi mjera referentnog prstena na prsten koji se umjerava. Ovakav način mjerenja zahtjeva pouzdanu mjeru referentnih prstena.

Metodom mjerenja ticalom mogu se mjeriti prsteni promjera manjeg od 8 mm, ali ukoliko se za referentni etalon koristi referentni prsten njegova mjera mora biti poznata.

Metodom mjerenja ticalom koja za referentni etalon koristi planparalelnu graničnu mjerku mogu se mjeriti unutarnji promjeri prstena manji od 8 mm, te kako se ne koriste referentni prsteni nema potrebe za vanjskim umjeravanjem etalonskih prstena. Na Slici 1. prikazane su metode mjerenja i njihovi nedostaci.



Slika 1. Metode mjerenja unutarnjeg promjera prstena

Hoće li metoda sa ticalom i graničnom mjerkom davati zadovoljavajuće rezultate, i kakvi su ti rezultati u odnosu na ostale dvije metode; odgovorit će se u kasnijim poglavljima.

Kako znamo da mjerni uređaj radi sa odgovarajućom točnosti i koja je nesigurnost dobivenih rezultata i kako je određena? Na to pitanje odgovoreno je već u sljedećem potpoglavlju detaljnim pojašnjenjem mjerne sljedivosti i umjeravanja.

Kako se mjere unutarnji promjeri prstena izvan Nacionalnog laboratorija za duljinu, točnije u industriji; ti uređaji su opisani u potpoglavlju 1.2.

Što to su to mjerni prsteni i pregled ostalih Nacionalnih instituta koji ih umjeravaju prikazano je u potpoglavljima 1.3. i 1.4.

1.1 Sljedivost i umjeravanje

Kvaliteta proizvoda i usluga u sve većoj mjeri ovisi o pouzdanim mjerenjima. Važnost koja se pridaje mjerenjima odražava se u odgovarajućim etalonima zahtjevom da mjerenja moraju biti sljediva prema nacionalnim ili međunarodnim etalonima.

Tri glavna zadatka mjeriteljstva su:

1. definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica,
2. ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama,
3. utvrđivanje lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prenošenju tog znanja.

Jedan od najvažnijih zadataka Nacionalnog laboratorija za duljinu je osiguranje mjerne sljedivosti.

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s referentnim etalonima (državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja od kojih svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. To bi značilo da se dobiveni rezultat mjerenja nastoji koracima unatrag dovesti u vezu s primarnim etalom.

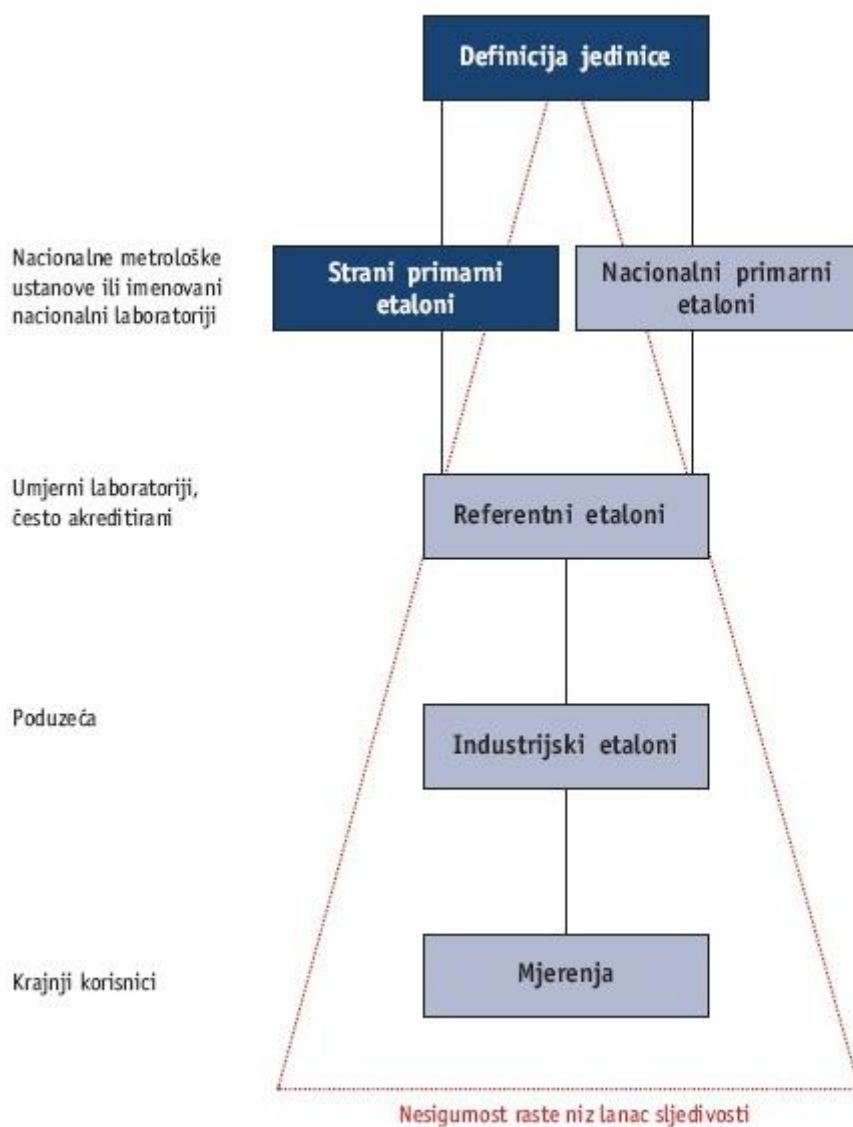
Etalon je mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referenca.

U Nacionalnom laboratoriju za duljinu mjerna sljedivost propisana je *Priručnikom o kvaliteti* i osigurava se na sljedeće načine:

- Etaloni prvog reda za duljinu, kut i hrapavost umjeravaju se u jednom od europskih nacionalnih mjeriteljskih instituta.
- Provjera i potvrđivanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja radnih etalona (etaloni za navoj, mjerni prsteni, mjerni čepovi, mjerne skale...) provjeravaju se u redovitim usporedbenim mjerenjima unutar EURAMET i LABCOM grupe.
- Umjeravanje, odnosno osiguravanje sljedivosti za čitav niz sekundarnih i radnih etalona, te mjernih uređaja provodi se interno u Laboratoriju korištenjem etalona prve linije.

Lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedbi, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Time se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini koji u krajnosti završavaju primarnim etalom.

Na Slici 2. shematski je prikazan lanac sljedivosti.



Slika 2. Lanac sljedivosti

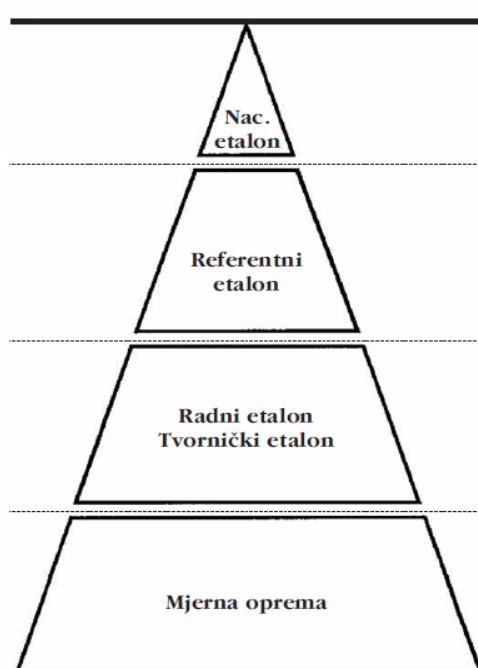
Krajnji korisnik može postići sljedivost do najviše međunarodne razine izravno od nacionalne mjeriteljske ustanove ili od sekundarnoga umjernog laboratorija, u pravilu akreditiranog laboratorija. Kao rezultat različitih sporazuma o međusobnom priznavanju, sljedivost se može dobiti od laboratorija izvan države korisnika.

Sljedivost se opisuje nizom bitnih elemenata:

- **neprekinut lanac usporedaba** - vodi prema etalonu koji je međunarodno prihvatljiv, obično nacionalnomu ili međunarodnomu etalonu;

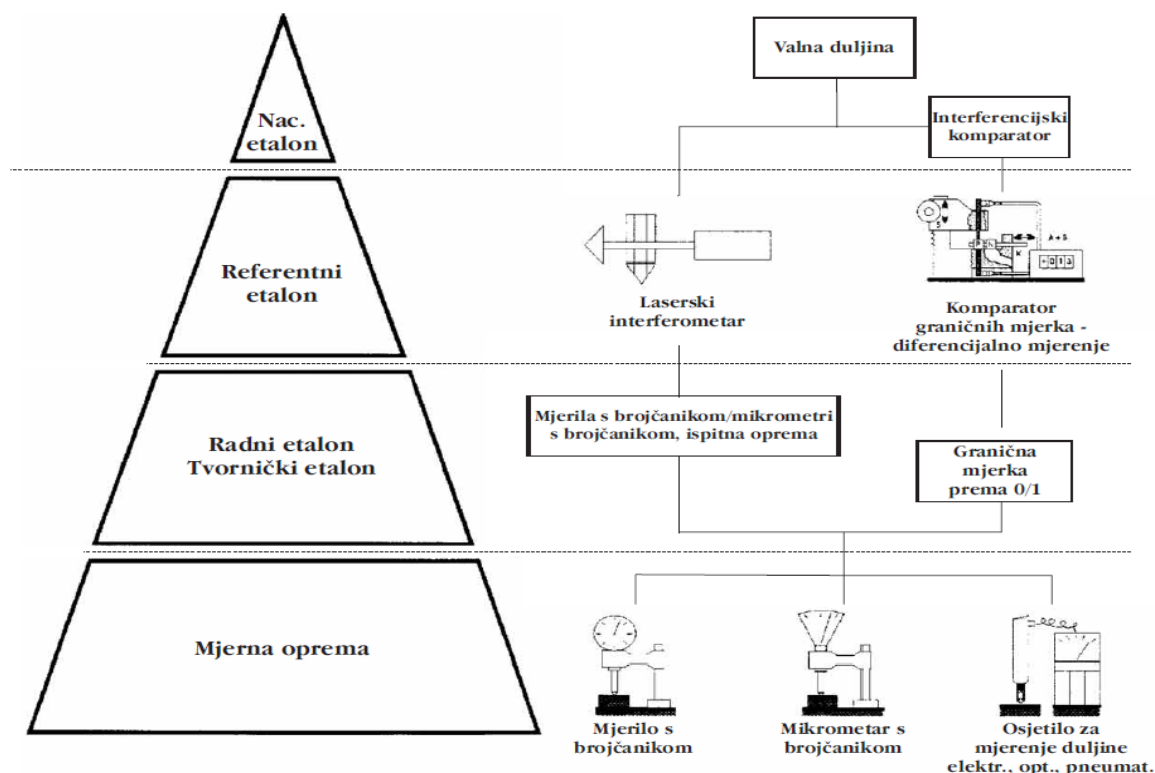
- **mjerna nesigurnost** - za svaki korak u lancu sljedivosti mora se izračunati u skladu s dogovorenim metodama;
- **dokumentacija** - svaki korak u lancu mora se provoditi u skladu s dokumentiranim i općenito prihvaćenim postupcima; rezultati se moraju dokumentirati na isti način;
- **mjerodavnost** - laboratoriji ili tijela koja provode jedan ili više koraka u lancu moraju pružiti dokaze o svojoj tehničkoj mjerodavnosti, npr. dokazom da su akreditirani;
- **referencija na SI jedinice** - lanac usporedaba mora završavati primarnim etalonima za ostvarenje SI jedinica;
- **ponovna umjeravanja** - umjeravanja se moraju ponavljati u odgovarajućim vremenskim intervalima; duljina tih intervala ovisit će o nizu varijabla, npr. zahtijevanoj nesigurnosti, čestoći uporabe, načinu uporabe i stabilnosti opreme.

Na Slici 3. prikazana je hijerarhija etalona i mjeriteljski organizacijski ustroj za praćenje mjernih i ispitnih rezultata.

<i>Etalon (mjerna oprema)</i>	<i>Odgovoran</i>	<i>Ciljevi</i>	<i>Temelj za umjeravanje ili mjerenje</i>	<i>Dokumentacija o umjeravanju ili mjerenju</i>
 <p>Nac. etalon</p>	Nacionalni mjeriteljski institut	Održavanje i prenošenje vrijednosti s nacionalnih etalona	Zakonska dužnost reprezentacije SI jedinica i osiguranja mjerne sukladnosti	Potvrda o umjeravanju za referentni etalon
Referentni etalon	Akreditirani umjerni laboratoriji	Čuvanje mjeriteljske infrastrukture zemlje	Potvrda o umjeravanju nacionalnog mjerit. instituta ili drugoga akreditiranog laboratorija	Potvrda o umjeravanju za radni ili tvornički etalon
Radni etalon Tvornički etalon	Kućni odsjek za umjeravanje	Nadzor nad ispitnom opremom za kućne potrebe	Potvrda o umjeravanju nacionalnog mjerit.instituta ili akreditiranog laboratorija	Tvorička potvrda o umjeravanju, znak umjeravanja ili sl. za ispitnu opremu
Mjerna oprema	Svi odsjeci u tvrtki	Mjerenja i ispitivanja kao dio mjera osiguravanja kakvoće	Tvorička potvrda o umjeravanju, oznaka umjeravanja i sl.	Oznaka ispitivanja ili sl.

Slika 3. Hijerarhija etalona

Na Slici 4. su prikazani i primjeri mjerne opreme prema hijerarhiji etalona.



Slika 4. Hijerarhija etalona

Umjeravanje je radnja kojom se pod određenim uvjetima u prvome koraku uspostavlja odnos između vrijednosti veličine s mjernim nesigurnostima koje daju mjerni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene mjerne nesigurnosti, a u drugome koraku ti se podatci upotrebljavaju za uspostavljanje odnosa za dobivanje mjernog rezultata iz pokazivanja.

Rezultati umjeravanja izdaju se u potvrdi o umjeravanju (certifikatu), a često se na umjereno mjerilo stavlja umjerna naljepnica.

Četiri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. uspostavljanje i prikaz sljedivosti;
2. osiguravanje da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima;
3. određivanje točnosti očitavanja mjerila;
4. utvrđivanje pouzdanost mjerila.

1.2 Mjerila za mjerenje unutarnjih promjera [1]

U današnjim laboratorijima postoje sofisticirani i skupi mjerni uređaji za precizna mjerenja koja se odvijaju u strogo određenim uvjetima te zahtijevaju adekvatan nadzor i vremenski period potreban za određenu izmjeru. Međutim, u industrijskoj praksi često puta je potrebno izvršiti brze kontrolne mjere te se u tim slučajevima pribjegava bržim, jeftinijim i manje točnim mjernim uređajima i mjerilima.

Mjerila za mjerenje unutarnjih promjera dijele se na:

- pomična mjerila;
- mikrometre,
- subita,
- mjerila s iglom za male promjere.

Pomično mjerilo dijeli se na:

- **Klasično pomično mjerilo** jedno je od najčešće korištenih ručnih mjerila za mjerenje unutarnjih i vanjskih karakteristika. Služi za mjerenje kako standardnih duljina tako i unutarnjih i vanjskih promjera te dubina. Osnovu mu predstavlja mjerna letva s kljunom na koju je ugravirana milimetarska skala te klizač s kljunom koji klizi po letvi uz mjerne šiljke i izbočenja za mjerenje unutarnjih karakteristika, odnosno dubina. Izrađuju se u rezoluciji očitavanja (0,1; 0,05; 0,02) mm, a preciznijem očitavanju pomaže kočni mehanizam, odnosno najčešće je to vijak kojim se klizač pričvrsti za letvu. Izrađuju se u različitim veličinama pa im se i prema tome mjerni raspon kreće od (150 - 3000) mm. Materijal izrade najčešće je čelik, ali može biti i plastika ili drvo. Na Slici 5. prikazano je klasično pomično mjerilo.



Slika 5. Klasično pomično mjerilo

- **Digitalno pomično mjerilo.** Uporaba digitalnih pomičnih mjerila danas postaje sve učestalija. Mjerni raspon im se kreće od (0 - 1000) mm, ovisno o samom modelu, a očitavanja se vrše na digitalnom ekranu. Rezolucija je najčešće 0,01 mm. Materijal izrade je obično nehrđajući čelik, a moguće su i vodootporne izvedbe, izvedbe otporne na prašinu ili sa napajanjem pomoću solarne energije. Same kontaktne čeljusti mogu biti npr. izrađene od karbida ili keramike. Na Slici 6. prikazano je digitalno pomično mjerilo.



Slika 6. Digitalno pomično mjerilo sa keramičkim dodirnim čeljustima

Mikrometri su uređaji, odnosno mjerila koja se isto kao i pomična mjerila mogu koristiti za mjerenje različitih unutarnjih i vanjskih karakteristika, dubina provrta, profila navoja i zupčanika, ovisno o svojoj izvedbi. Klasični mikrometri obično imaju rezoluciju očitavanja od oko 0,01 mm, dok su oni digitalni precizniji i ta se rezolucija kreće oko 0,001 mm. Mjerni raspon najčešće iznosi (0 - 200) mm, dok se kod onih sa ekstenzivnim nastavcima taj raspon kreće i do 5000 mm.

Mikrometar se dijeli na:

- **Klasični mikrometar za unutarnja mjerenja** mogu imati više izvedbi, ovisno o samom obliku mjernih čeljusti. Slika 7. prikazuje jedan oblik moguće izvedbe čeljusti mikrometra sa rezolucijom očitavanja 0,01 mm te mjernim rasponom od (25 - 50) mm. Mjerni raspon ove serije mikrometara se kreće od (5 - 300) mm, izrađen je od nehrđajućeg čelika, a same dodirne površine čeljusti su izrađene od karbida.



Slika 7. Klasični mikrometar za unutarnja mjerenja - 2. izvedba čeljusti

- **Digitalni mikrometar za unutarnja mjerenja.** Slika 8. prikazuje digitalni mikrometar sa rezolucijom očitavanja 0,001 mm. Materijal izrade je nehrđajući čelik, a dodirne površine čeljusti su od karbida. Moguće je spajanje na računalo te prenošenje izmjerenih podataka na taj način. Mjerni raspon ove serije digitalnih mikrometara je od (5 - 100) mm.



Slika 8. Digitalni mikrometar

- **Klasični trokraki mikrometar za unutarnja mjerenja** služe za mjerenje kako klasičnih tako i slijepih provrta, a izrađeni su najčešće od nehrđajućeg čelika. Mjerni raspon ovakvih mikrometara iznosi od (3 - 300) mm, a rezolucija očitavanja 0,005 mm, dok za niže mjerne raspone ona može iznositi i 0,001 mm. Kao što im i samo ime kaže imaju 3 kraka, odnosno mjerna ticala koja su samocentrirajuća te se pokreću pomoću navojnog mjernog vretena. Set ovakvih mjerila je prikazan na slici 9.



Slika 9. Set trokrakih mikrometara sa pripadajućim komponentama

- **Digitalni trokraki mikrometar.** Isto kao i klasični trokraki mikrometri i digitalni se mogu prodavati zasebno prilagođeni za mjerenje u određenom mjernom rasponu te u setovima. Mjerni raspon kod individualnih se kreće od (3 - 300) mm, a kod mjernih setova od (3 - 100) mm uz što standardno dolaze prsteni za podešavanje te štapni nastavci. Rezolucija je viša te iznosi 0,001 mm. Kontaktne površine mogu biti od tvrdog metala, prevučene titan nitridom i slično. Mjerilo je prikazano na Slici 10.



Slika 10. Digitalni trokraki mikrometar

- **Subita** su mjerni uređaji koji uključuju mjernu uru odnosno komparator, a njime se mogu mjeriti različiti unutarnji promjeri, od izrazito malih provrta sve do raznih slijepih i sferičnih provrta. Sa subitima dolaze i mjerni nastavci kojih može biti po desetak, ovisno o samom subitu. Postoji mnoštvo proizvođača subita i njihov izgled varira od jednog do drugog proizvođača. Rukovanje subitima je jednostavno, a sama očitavanja su izrazito točna, ovisno o samoj rezoluciji uređaja. Na Slici 11. prikazan je subito za mjerenje vrlo malih provrta.



Slika 11. Subito za mjerenje vrlo malih provrta

- **Mjerila s iglom za male promjere** imaju 2 prstenasta dijela, tzv. igle čiji je promjer nešto manji od samog promjera provrta. Ticala su koničnog oblika, a sam kontakt ticala i provrta se ostvaruje preko koničnog čepa u unutarnjem dijelu mjernog uređaja. Prilikom pomicanja ručke za produljenje/skraćivanje ticala taj se dio aksijalno pomiče kroz mjerni uređaj. Ticala su osigurana oprugom te konični dio gura ticala u jednom smjeru, a opruge ih vraćaju u suprotni. Na taj način se na komparatoru pokazuje sam rezultat mjerenja, odnosno smjer promjene dimenzije provrta u odnosu na one zadane [1]. Slika 12. prikazuje takvo mjerilo sa mjernim rasponom od (0,95 - 20,6) mm. Točnost iznosi (3 - 4) μm , a ponovljivost 1 μm .



Slika 12. Mjerilo za male promjere s iglom

1.3 Mjerni prsteni

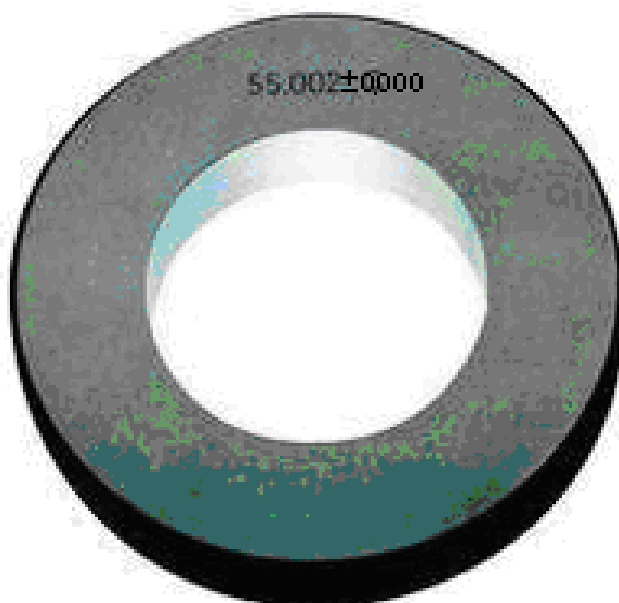
Mjerni prsteni služe kao etaloni za mjerenje duljine unutarnjeg promjera. Pouzdana mjera promjera prstena od velikog je značaja s obzirom da se mjerni prsteni koriste za podešavanje i umjeravanje ručnih mjerila opisanih u prethodnim potpoglavljima.

Postoje referentni i kontrolni prsteni. Kontrolni prsten je prsten na kome je naznačena mjera, ali ne i presjek na koji se odnosi. Isti je prikazan na Slici 13.



Slika 13. Kontrolni prsten

Referentni prsten je prsten sa naznačenom mjerom i tolerancijom te mjere. Isti je prikazan na slici 14.



Slika 14. Referentni prsten

Nacionalni laboratorij za duljinu posjeduje kontrolne prstene duljine u rasponu od 2,501 mm do 105 mm koji su prikazani na Slici 15, te dva glavna referentna prstena \varnothing 13,9983 mm i \varnothing 50,0004 mm koji su prikazani na Slici 16. i 17.



Slika 15. Kontrolni prsteni



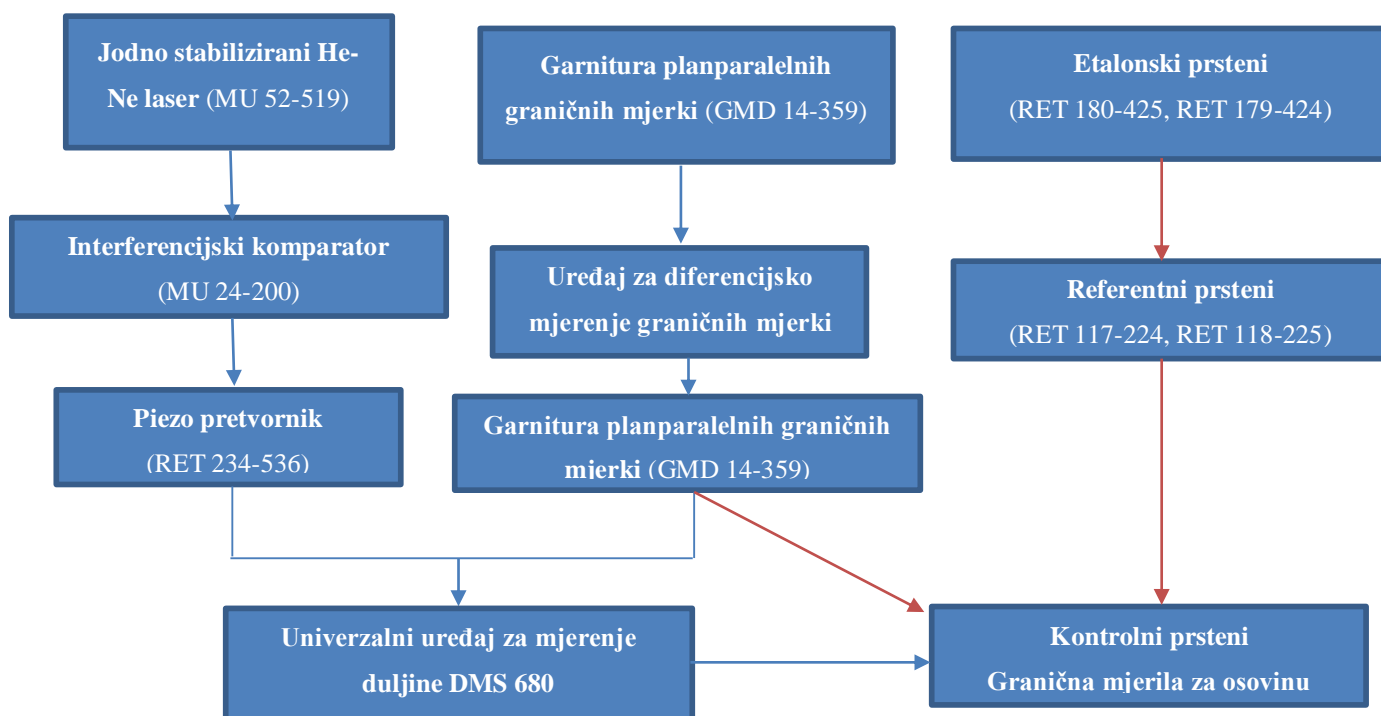
Slika 16. Referentni prsteni Ø13,9983 mm



Slika 17. Referentni prsteni Ø50,0004 mm

Na Slici 18. prikazan je blok dijagram osiguravanja sljedivosti za kontrolne i referentne prstene

.



Slika 18. Osiguravanje sljedivosti za kontrolne prstene

1.4 Usporedba mjeriteljskih sposobnosti Nacionalnih instituta za mjerenje duljine unutarnjeg promjera [2]

U ovom potpoglavlju dana je usporedba mjeriteljskih sposobnosti Nacionalnih laboratorija za duljinu (eng. Calibration and measurement capabilities [CMC]), točnije za mjerenje duljine unutarnjeg promjera. Usporedba je prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba CMC-a prema Nacionalnim laboratorijima za duljinu

Država	Naziv instituta	Standardi promjera	Mjerni uređaj	Proširena nesigurnost ($k = 2$, razina povjerenja od 95%) u μm
Hrvatska	Nacionalni laboratorij za duljinu	8 mm - 150 mm	Univerzalni uređaj za mjerenje duljine	$(0,6 + 0,7D)$, D u m
Finska	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd	0.002 m - 1 m	1D kontaktni komparator	$Q[0,2; 0,87L]$, L u m
Njemačka	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	2 mm - 200 mm	1D kontaktni komparator	$Q[48; 0,4L]$, L u mm
Italija	Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica	1 mm - 150 mm	1D kontaktni komparator	$Q[0,1; 0,5E-03L]$, L u mm
Poljska	Główny Urząd Miar, Central Office of Measures	3 mm - 500 mm	CMM	$Q[0,7; 1,2D]$, D u m
Velika Britanija	National Physical Laboratory	3 mm - 250 mm	Kontaktni komparator s interferometrom	$(0,07 + 0,0005D)$, D u mm
S.A.D.	National Institute of Standards and Technology	2 mm - 100 mm	Kontaktni komparator	$(85 + 0,4L)$, L u mm

2 Mjerne metode duljine unutarnjeg promjera prstena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu

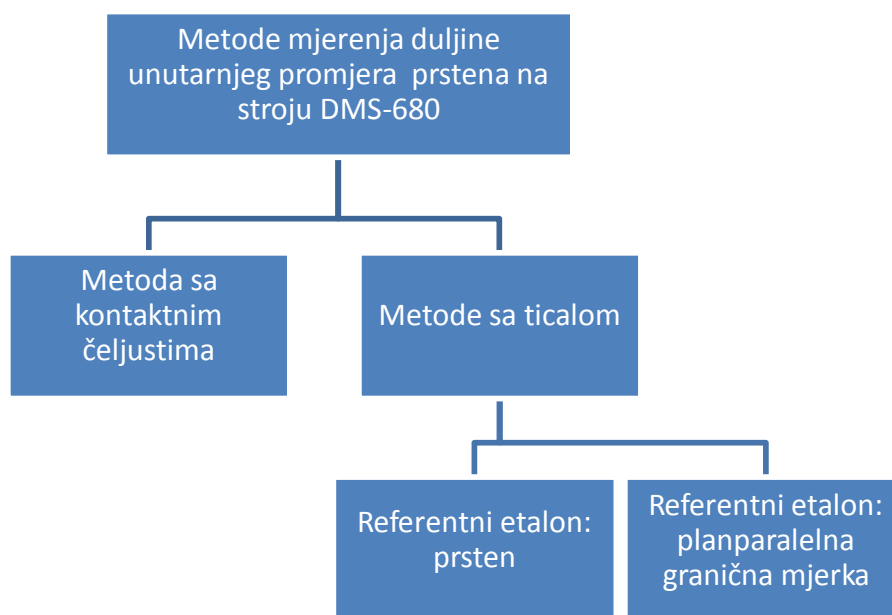
Kao što je već spomenuto u uvodu mjerenja unutarnjeg promjera prstena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu RH mjere se na uređaju DMS 680.

Za mjerenje duljine unutarnjeg prstena trenutno se koriste dvije mjerne metode:

- mjerna metoda sa kontaktnim čeljustima;
- mjerna metoda sa ticalom i referentnim prstenom kao referentnim etalonom.

U ovom diplomskom radu dan je i prijedlog **metode sa ticalom i planparalelnom graničnom mjerkom kao referentnim etalonom.**

Metoda je detaljno razrađena i ispitana u potpoglavlju 2.4. te je dana njena mjerna nesigurnost u potpoglavlju 2.4.1. i usporedba rezultata u odnosu na ostale dvije metode u poglavlju 4.



Slika 19. Metode mjerenja duljine unutarnjeg promjera prstena

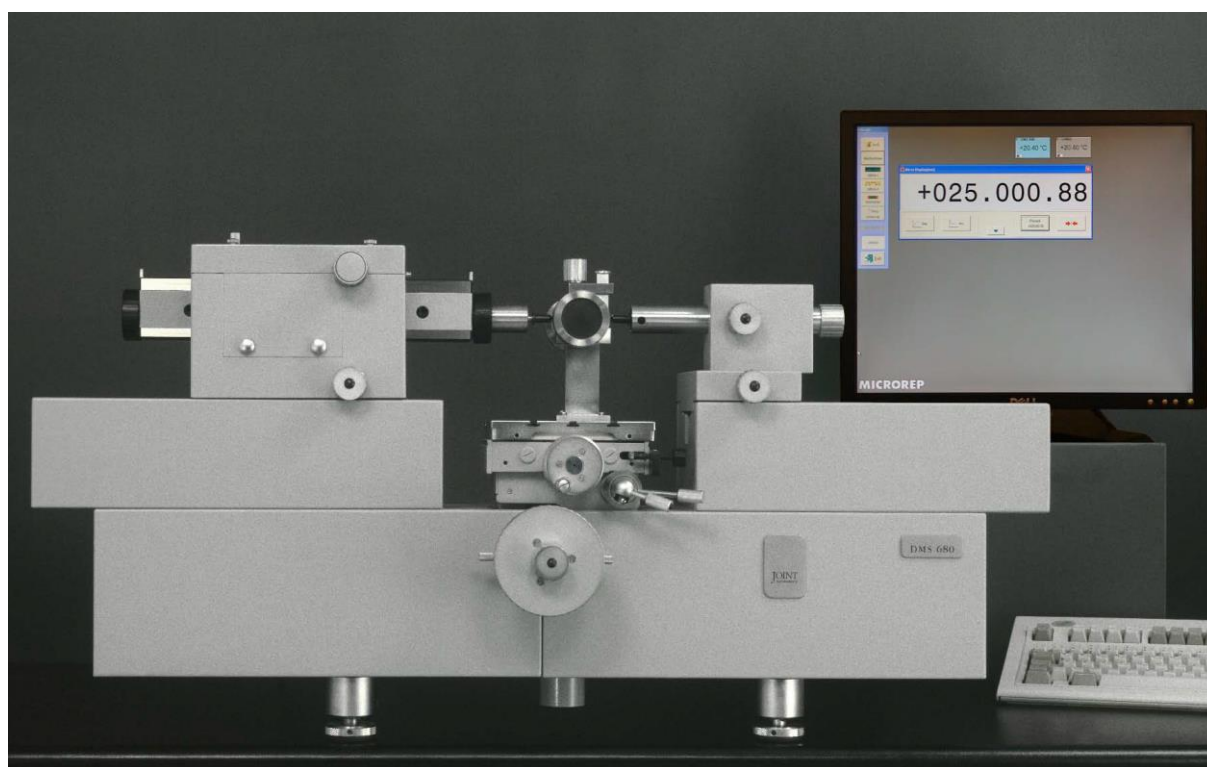
U idućim potpoglavljima biti će opisan uređaj na kojem se vrše mjerenja i opisat će se tri spomenute metode.

2.1. Univerzalni mjerni uređaj DMS 680 [3]

Univerzalni mjerni uređaj DMS 680 je precizan jednoosni mjerni instrument za mjerenje duljine. Njegova visoka točnost dobivena je zbog:

- potpune usklađenosti sa Abbe-ovim mjernim principom;
- konstantne mjerne sile;
- radnog stola podesivog u svim smjerovima;
- mjerne skale proizvođača Heidenhain rezolucije $0,01\text{ }\mu\text{m}$;
- izravnog očitavanja s računala s automatskom detekcijom maksimalne i minimalne vrijednosti;
- softvera koji uračunava sva prethodna umjeravanja;
- kompenzacije temperature u realnom vremenu.

Na Slici 20. prikazan je univerzalni mjerni uređaj DMS 680.



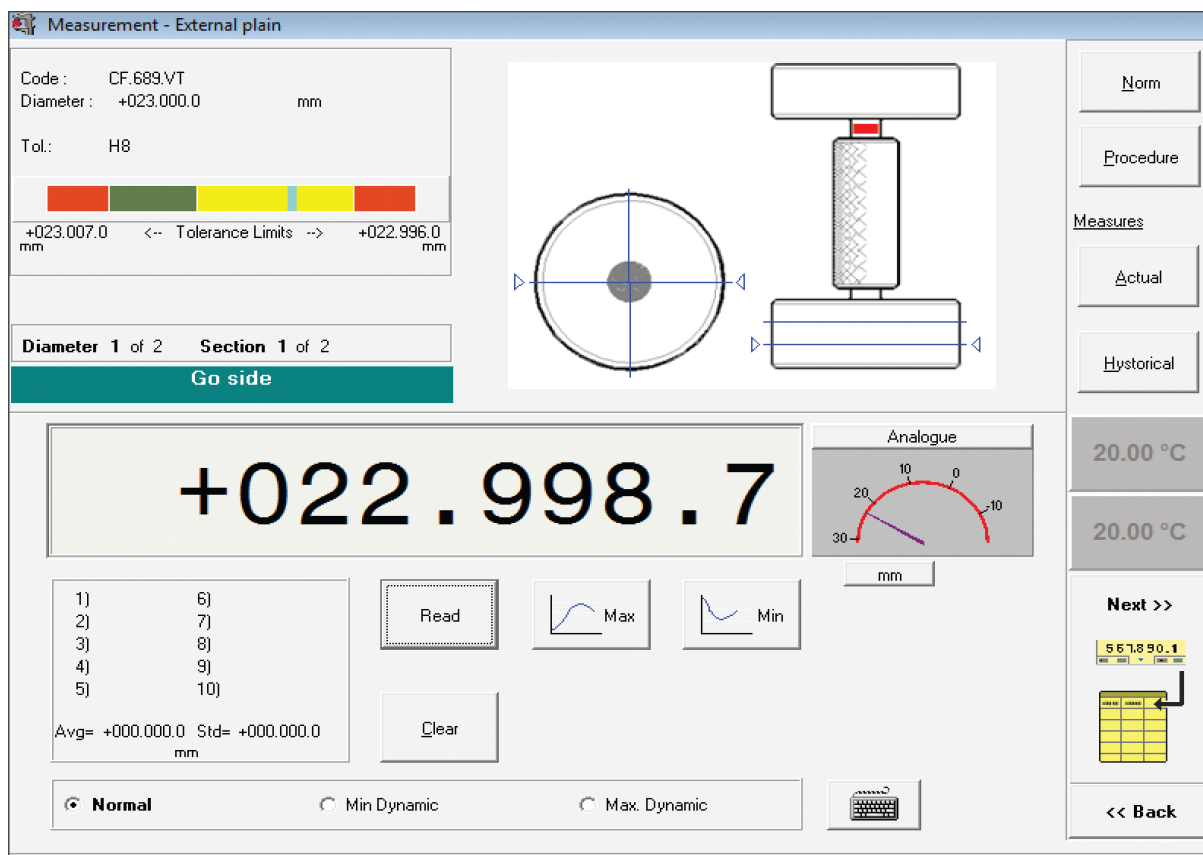
Slika 20. Univerzalni mjerni uređaj DMS 680

Ovaj uređaj spojen je na računalo gdje se očitavaju izmjerene vrijednosti. Računalni program je standardno uključen u paket, te mjeritelj dobiva sve upute tokom procesa mjerenja:

- izračuni greške zbog tolerancija se provode automatski;
- procjenjuje se formulacija navoja;

- zapis svih podataka o mjerenju, uključujući datum umjeravanja, mjesto, proceduru, etalon i ostalo;
- mjerke su podijeljene ovisno o tipu, nazivnim dimenzijama i drugim kriterijima;
- procedura mjerenja je uvijek dostupna i može biti prikazana tokom procesa mjerenja;
- pruža mogućnost praćenja povijesti mjerenja, svako mjerenje je snimljeno s podacima o mjeritelju, referentnom etalonu i korištenoj opremi;
- funkcija kompenzacije temperaturnih odstupanja.

Na slici 21. prikazano je sučelje softvera.



Slika 21. Prikaz sučelja računalnog programa

2.1.1. Granična pogreška uređaja

Točnost mjernog uređaja DMS 680 u odnosu na graničnu pogrešku uređaja, mjernu nesigurnost i ponovljivost mjernih rezultata prikazani su na certifikatu o umjeravanju. Certifikat se nalazi u Prilogu.

2.1.2. Tehnička specifikacija

Tehnička specifikacija uređaja DMS 680 prikazana je u Tablici 2.

Tablica 2. Tehnička specifikacija

Područje mjerenja	Apsolutno	100 mm
	Usporedbeno	680 mm
Rezolucija	Standardna	0,1 μm
	Opcionalna	0,01 μm
Nosivost	11 kg	
Napajanje	110 V- 220V	
Gabaritne izmjere	1300 mm x 400 mm x 480 mm	
Masa	110 kg	
Mjerna sila	0 N - 11N	
Standardno uključena oprema	<ul style="list-style-type: none"> • radni stol podesiv u svim smjerovima – okomito, vodoravno, rotacija vrha 	
	<ul style="list-style-type: none"> • jedinica za očitavanje (računalo) 	
	<ul style="list-style-type: none"> • uređaj za mjerenje navojnog čepa 	
	<ul style="list-style-type: none"> • uređaj za mjerenje prstena 	
	<ul style="list-style-type: none"> • mjerni uređaj za mjerenje malih rupa 	
	<ul style="list-style-type: none"> • uređaj za kompenzaciju temperature 	

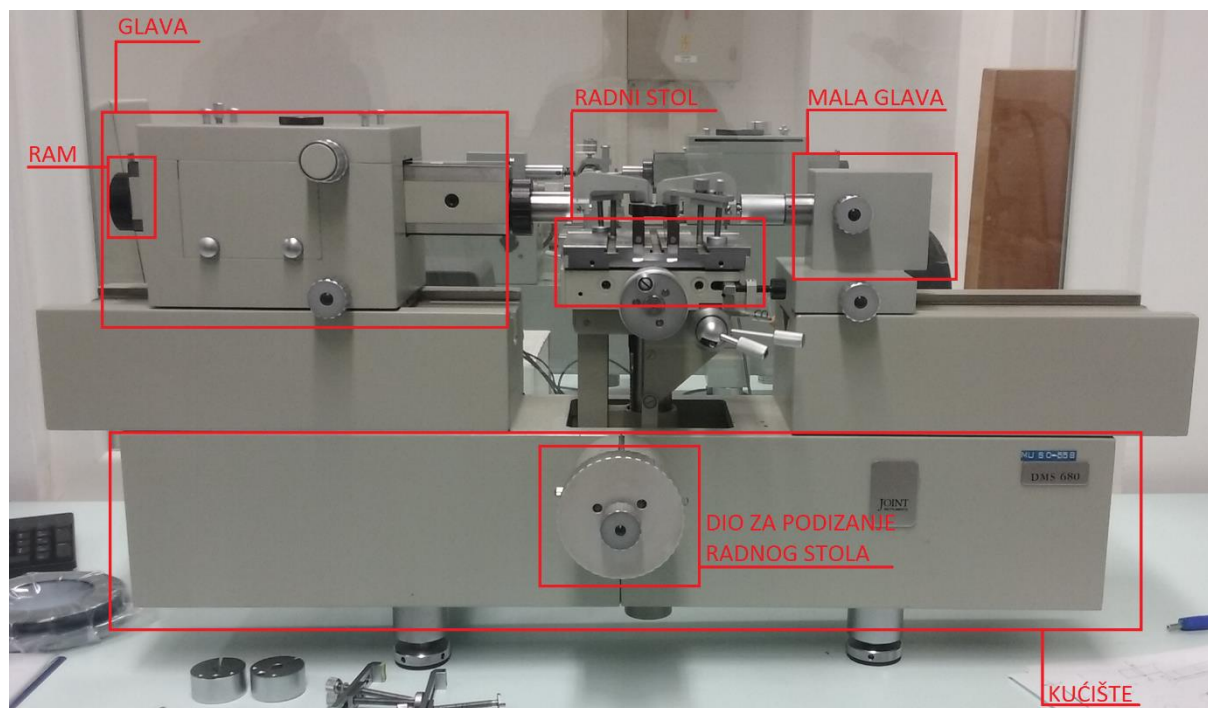
Područje primjene (dimenzije) je prikazano u Tablici 3.

Tablica 3. Područje primjene

Vanjska površina	0 mm – 680 mm
Unutarnja površina	1 mm – 480 mm
Vanjski navoj	0 mm – 480 mm
Unutarnji navoj	3 mm – 400 mm

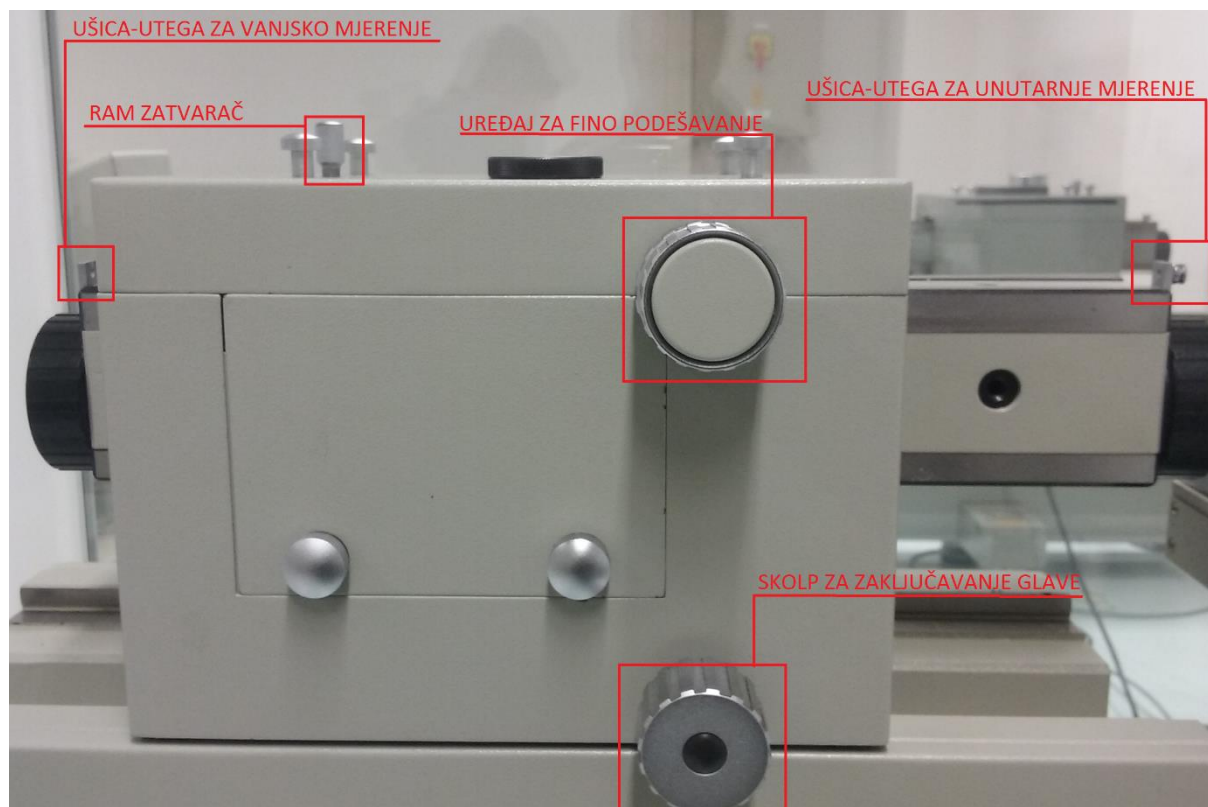
2.1.3. Kompozicijska struktura

Prije opisa metoda mjerenja važno je opisati dijelove mjernog uređaja. Na Slici 22. prikazani su glavni dijelovi mjernog uređaja.



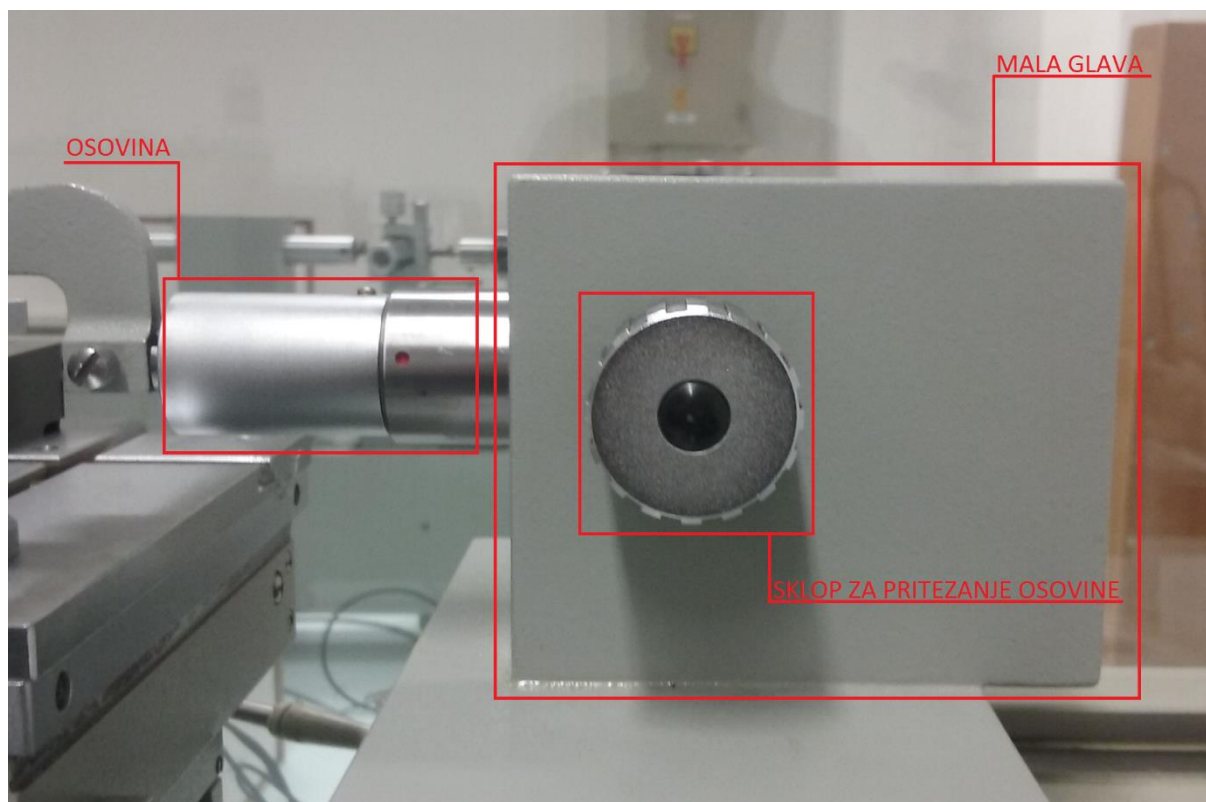
Slika 22. DMS 680

Na Slici 23. prikazani su dijelovi glave.



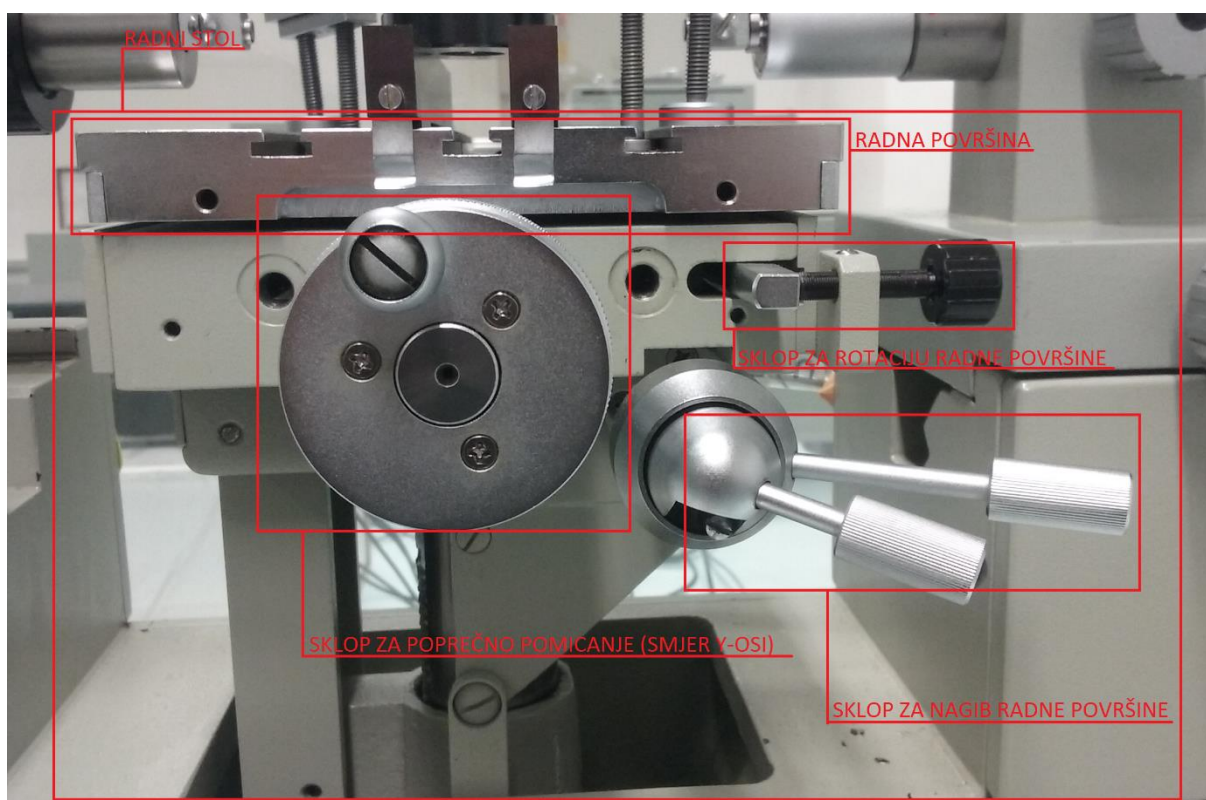
Slika 23. Glava

Na Slici 24. prikazani su dijelovi male glave (engl. tailstock).



Slika 24. Mala glava

Na Slici 25. prikazani su dijelovi radnog stola.



Slika 25. Radni stol

2.2. Mjerna metoda duljine unutarnjeg promjera prstena s kontaktnim čeljustima

Mjerenje duljine unutarnjeg promjera mjernog uzorka na univerzalnom mjernom uređaju DMS 680 je usporedna metoda. Predmeti mjerenja se na tom uređaju mjere pomoću referentnih prstena poznate mjere. U 1.1. potpoglavlju naznačeno je da je jedan od tri glavna zadatka mjeriteljstva utvrđivanje lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja. Stoga se postavlja pitanje kako je određena mjera i tolerancija te mjere referentnog prstena?

Referentni prsteni umjeravaju se istom usporedbenom metodom pomoću etalonskih prstena kao što je predmet mjerenja (kontrolni prsten) umjeren pomoću referentnog prstena. Nacionalni laboratorij za duljinu nema mogućnost apsolutnog umjeravanja promjera etalonskih prstena stoga svake četiri godine umjerava referentne prstene u jednom od inozemnih mjeriteljskih instituta.

Važno je napomenuti da se ovom metodom ne mogu umjeravati prsteni unutarnjeg promjera manjeg od 8 mm.

U ovom umjeravanju koriste se:

- univerzalni uređaj DMS 680,
- referentni mjerni prsten \varnothing 13,9991 mm,
- kontrolni mjerni prsten \varnothing 15,997 mm,
- dvije male kontaktne čeljusti,
- paralelni nosači na kojima stoji prsten,
- digitalni termometar sa sondom.

Na Slici 26. prikazan je referentni mjerni prsten $\varnothing 13,9991$ mm.



Slika 26. Referentni mjerni prsten $\varnothing 13,9991$ mm

Na Slici 27. prikazan je kontrolni mjerni prsten $\varnothing 15,997$ mm.



Slika 27. Kontrolni mjerni prsten $\varnothing 15,997$ mm

Na Slici 28. prikazane su male kontaktne čeljusti izvan uređaja DMS 680.



Slika 28. Male kontaktne čeljusti

Na Slici 29. prikazani su paralelni nosači na kojima stoji prsten izvan uređaja DMS 680.



Slika 29. Paralelni nosači

Na Slici 30. prikazan je digitalni termometar sa sondom.



Slika 30. Digitalni termometar sa sondom

U daljnjem tekstu prikazani su koraci mjerne metode s kontaktnim čeljustima u Nacionalnom laboratoriju za duljinu.

Prije provedbe umjeravanja treba provjeriti valjanost certifikata referentnog prstena.

Certifikat za referentni mjerni prsten $\varnothing 13,9991$ mm nalazi se u Prilogu.

Koraci umjeravanja:

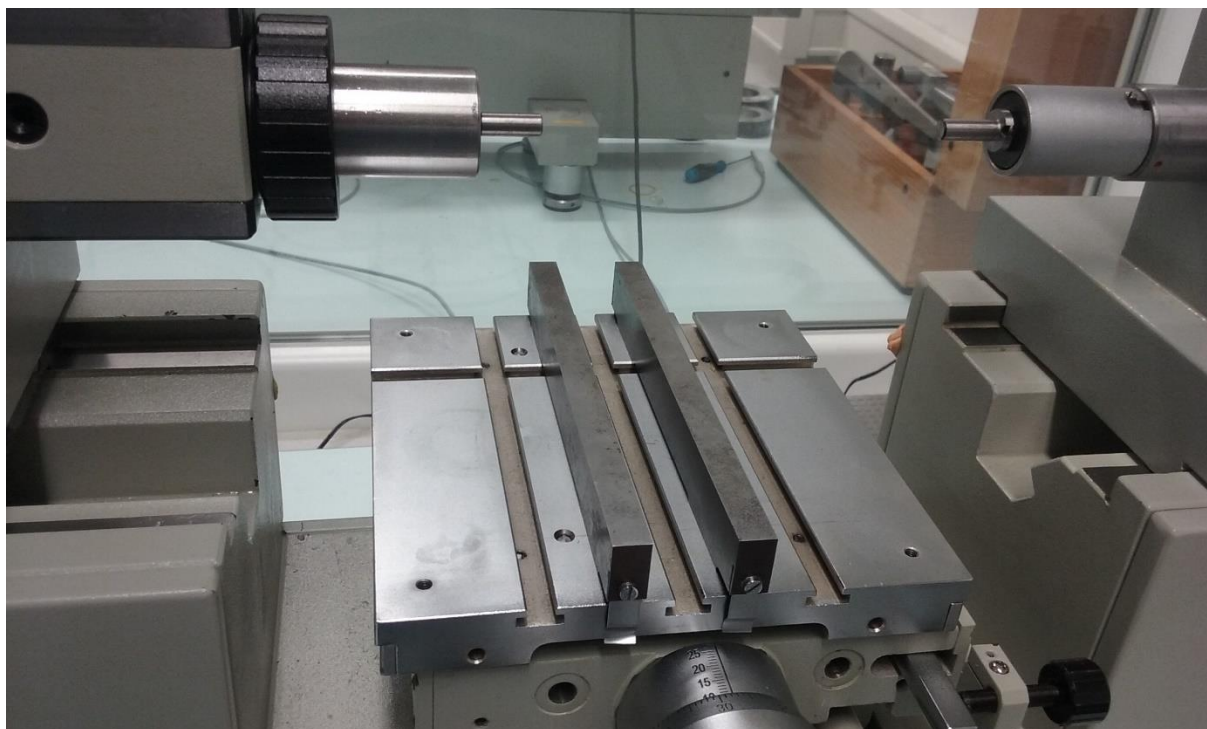
1. Mjerne površine mjerila i uređaja treba očistiti i odstraniti masnoću korištenjem medicinskog benzina, pamučne vate i čiste pamučne krpe.
2. Potrebno je provjeriti postojanje identifikacijskih oznaka (proizvođač, serijski broj, mjerno područje) i stanje mjernih površina (da li su mehanički oštećene ili korodirane). Rezultate ispitivanja prema točkama potrebno je upisati u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*. U slučaju da prsten ne zadovoljava zahtjeve iz točke 2, postupak umjeravanja se ne provodi.
3. Umjeravanje se provodi samo u slučaju ako je temperatura okoliša $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$.
4. Prije početka umjeravanja očita se temperatura referentnog i kontrolnog prstena. Temperature se očitavaju digitalnim termometrom sa sondom, oznaka OST 28-360. Razlika temperatura (Δt) ne smije biti veća od $0,1\text{ °C}$. Vrijednosti upisati u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*.
5. S obzirom da je umjeravanje unutarnjeg promjera prstena usporedbeno mjerenje, prije početka umjeravanja referentna vrijednost d_{ref} postavlja se pomoću referentnog prstena.

gdje je:

d_{ref} *duljina unutarnjeg promjera referentnog prstena*

Prije same pripreme potrebno je:

- namjestiti nagib radne ploče u horizontalnu ravninu;
 - namjestiti rotaciju radne ploče oko njenog srednjeg položaja;
 - podesiti poprečno pomicanje (oko Y osi);
 - spustiti radni stol u predodređenu poziciju.
6. Na radni stol stavljaju se dva paralelna nosača kako je prikazano na Slici 31.



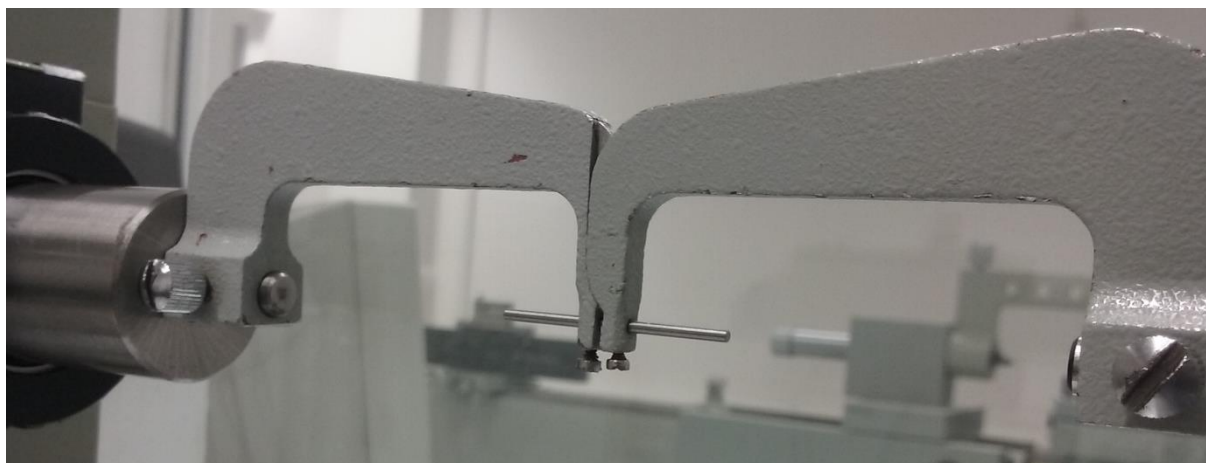
Slika 31. Stavljanje dva paralelna nosača na radni stol

7. Na pokretni i nepokretni dio učvršćuju se kontaktne čeljusti. Njihova veličina ovisi o dimenzijama prstena koji se mjeri. Velike kontaktne čeljusti se koriste za prstene kojima je promjer veći od 45 mm, a male kontaktne čeljusti se koriste za prstene kojima je promjer veći od 14 mm. Na Slici 32. prikazane su montirane kontaktne čeljusti.



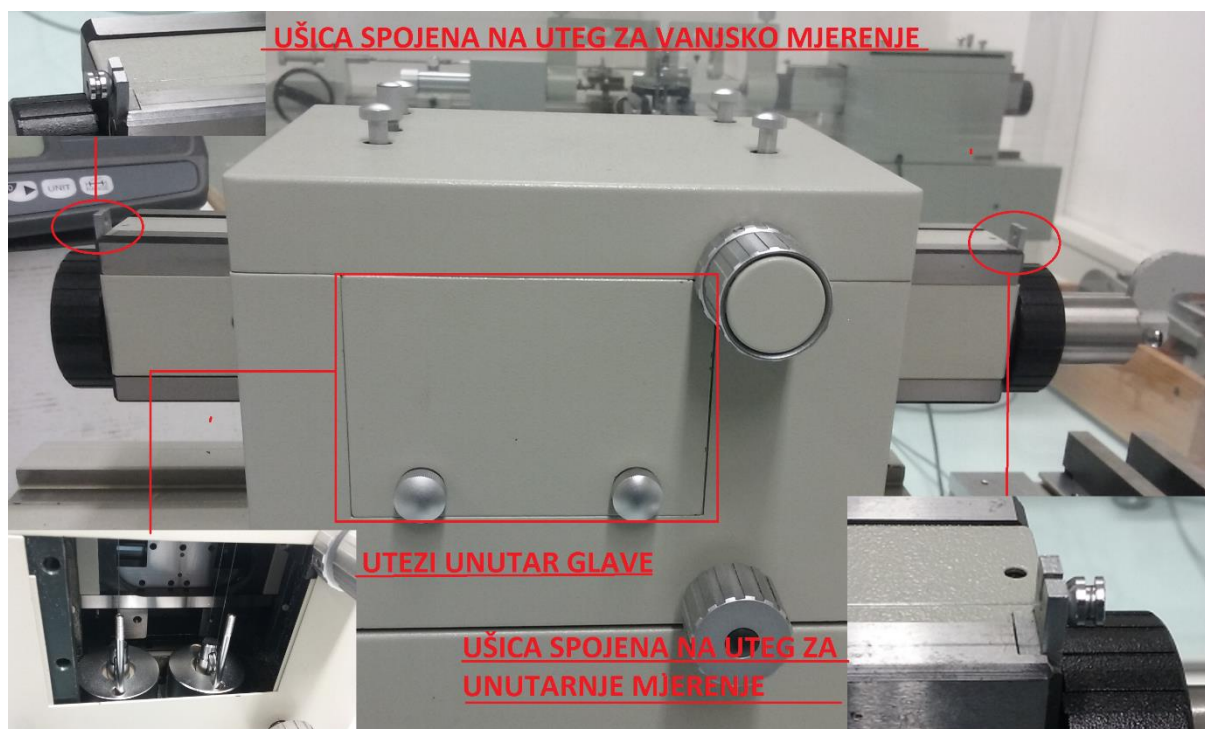
Slika 32. Postavljanje kontaktnih čeljusti

8. Čeljusti se probno spajaju i provjeravaju jesu li u odgovarajućem položaju pomoću valjčica za podešavanje. Proces je prikazan na Slici 33.



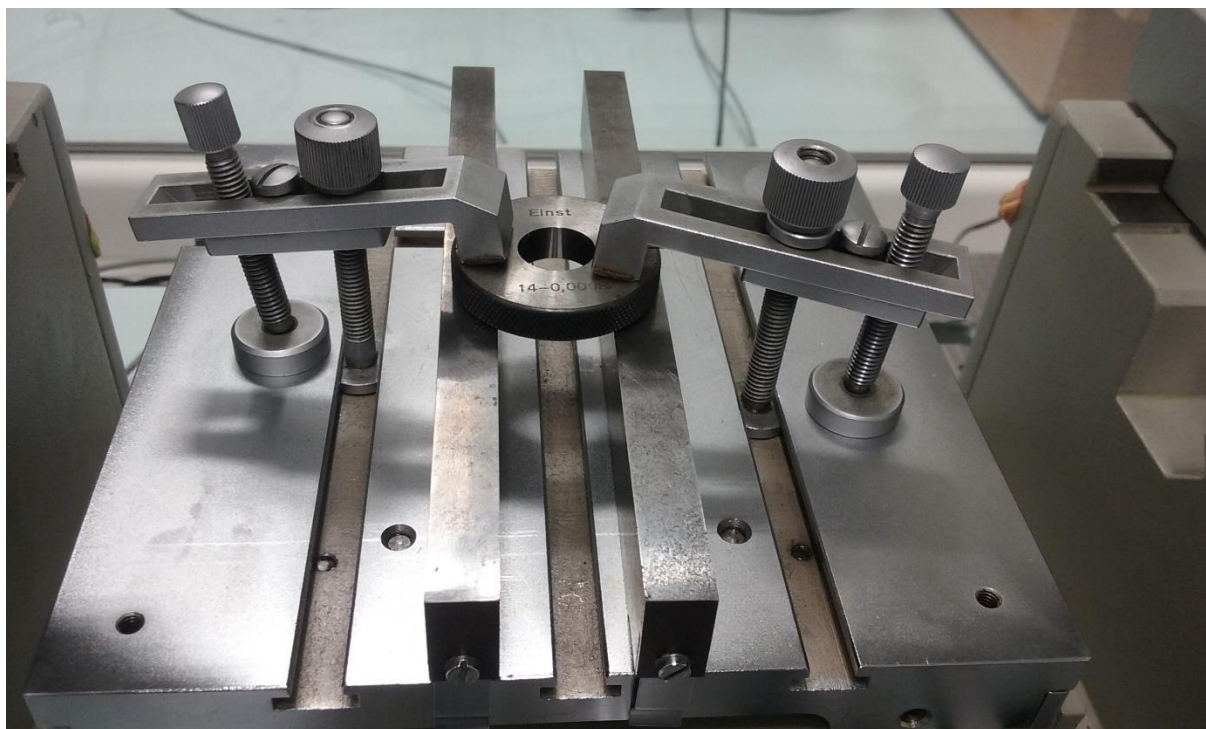
Slika 33. Probno spajanje čeljusti

9. Pričvršćuje se ušica koja je spojena na uteg za unutarnja mjerenja uz obavezno zaključavanje RAM zatvarača. Ušica je prikazana na Slici 34.



Slika 34. Pričvršćivanje ušice

10. Referentni prsten postavlja se na dva paralelna nosača te se isti osigurava od pomicanja pomoću dva alata za učvršćivanje koji su smješteni jedan nasuprot drugoga. Prije idućeg koraka još jednom se provjerava horizontalnost radnog stola. Ovaj korak prikazan je na Slici 35.



Slika 35. Postavljanje i učvršćivanje referentnog prstena

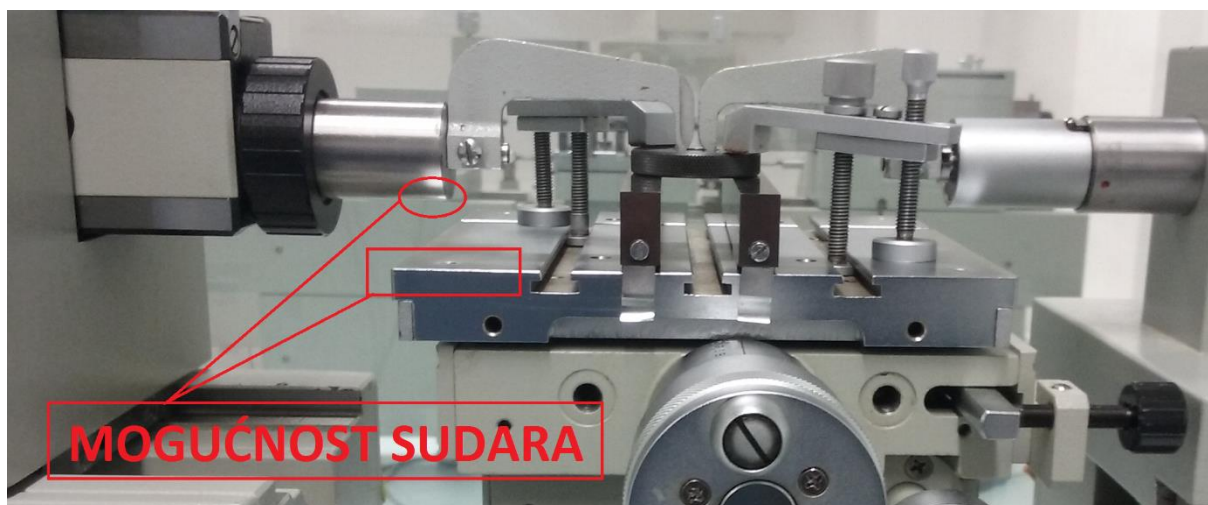
11. Pozicionira se lijeva kontaktna čeljust, spojena na osovinu glave uređaja, u poziciju ovisno o veličini promjera referentnog prstena i mjernog uzorka. Točnije:

- ukoliko je promjer referentnog prstena manji od promjera mjernog uzorka, početna pozicija postavlja se micanjem RAM-a u desno za dodatnih 90 % prijeđenog puta;
- ukoliko je promjer referentnog prstena veći od promjera mjernog uzorka, početna mjerna točka se postavlja micanjem RAM-a u lijevo za dodatnih 90 % prijeđenog puta;
- ukoliko je promjer referentnog prstena približnog iznosa kao promjer mjernog uzorka, početna mjerna točka se postavlja micanjem RAM-a u centar dotad prijeđenog puta (najbolji slučaj).

12. Provjera se da li su glava, mala glava i kontaktne čeljusti sigurno učvršćene u trenutnoj poziciji.

13. Pomiče se lijeva čeljust prema desnoj sve dok ne dođe u poziciju iznad unutarnjeg promjera prstena.

14. Podiže se radni stol kako bi kontaktni dio čeljusti došao u poziciju unutar prstena. U ovom koraku treba paziti da ne dođe do sudara osovine i radnog stola. Na Slici 36. označeni su dijelovi kod kojih može doći do sudara zbog nepažnje mjeritelja.



Slika 36. Mogućnost sudara

15. Kontaktne čeljusti lagano se dovode u dodir sa obje unutarnje strane referentnog prstena.

16. Postavlja se nula za trenutno očitavanje na uređaju, zbog lakšeg niveliranja i pronalaska prekretna točke.

17. Nastavlja se pozicioniranje prstena:

- poprečnim pomicanjem radnog stola tražeći maksimalnu prekretnu točku;
- promjenom nagiba radnog stola tražeći minimalnu prekretnu točku;
- ponavljajući poprečno pomicanje i promjenu nagiba radnog stola dok se na računalu ne pokaže odstupanje manje od $0,3 \mu\text{m}$.

Na Slici 37. prikazani su naznačeni su dijelovi pomoću kojih tražimo prekretnu točku.



Slika 37. Traženje prekretno točke

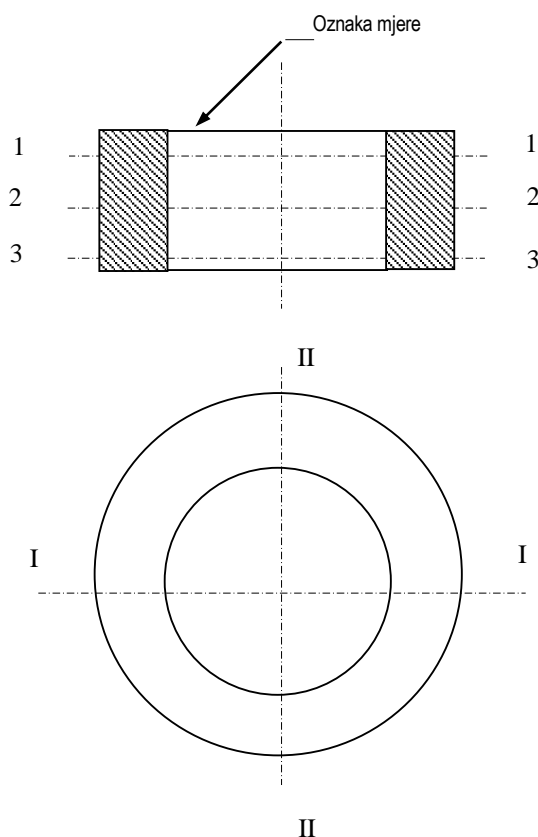
18. Nakon koraka 17. na računalu se prikaže duljina unutarnjeg promjera referentnog prstena te se na istom potvrdi taj iznos kako bi mogli nastaviti sa mjerenjem kontrolnog prstena. Dobivenu vrijednost upisati u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*.

Nakon završetka mjerenja referentnog prstena započinje mjerenje kontrolnog prstena. Postupak mjerenja kontrolnog prstena djelomično slijedi postupak mjerenja referentnog prstena. Kako bi se izmjerio kontrolni prsten nužno je ponoviti sljedeće korake iz pripreme mjerenja referentnog prstena:

- staviti kontrolni prsten na dva paralelna nosača, prateći instrukcije iz koraka 11.;
- pomiče se lijeva čeljust prema desnoj sve dok ne dođe u poziciju iznad unutarnjeg promjera kontrolnog prstena te se učvršćuje glava uređaja (korak 14.). Podiže se radni stol kako bi kontaktni dio čeljusti došao u poziciju unutar prstena (korak 15.);
- otključava se RAM zatvarač te se kontaktne čeljusti lagano dovode u dodir sa obje unutarnje strane kontrolnog prstena (korak 16.);
- Nastavlja se pozicioniranje kontrolnog prstena kako je opisano u koraku 18.

Nakon opisanog postupka na računalu se prikaže duljina unutarnjeg promjera kontrolnog prstena.

Mjerenje promjera kontrolnog prstena treba izvršiti u tri razine i u dva presjeka međusobno zakrenuta za 90 ° kako je prikazano na Slici 38. Mjerenje promjera potrebno je ponoviti tri puta po razini i dobivene vrijednosti upisati u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*.



Slika 38. Mjerenje kontrolnog prstena

Nakon što se izmjere sve tri razine promjera presjeka I-I miče se kontrolni prsten i ponovno se ponavlja mjerenje referentnog prstena kako bi se utvrdilo da nije došlo do promjene prve očitane referentne vrijednosti. Ukoliko je odstupanje unutar 0,1 μm referentni prsten zamjenjuje se kontrolnim zbog mjerenja presjeka II-II. Nakon što se izmjeri presjek II-II još jednom se provjerava odstupanje referentnog prstena.

2.2.1. Mjerna nesigurnost mjerne metode sa kontaktnim čeljustima [4]

Proračun za iskazivanje mjerne nesigurnosti preuzet je iz postupka za umjeravanje kontrolnih prstena *LFSB L 090*.

- Matematički model mjerenja.

$$d_x = d_{ref} + \Delta l + \delta_{li} + \delta_{lt} + \delta_{lp} + \delta_{lE} + \delta_{lA} \quad (1)$$

gdje je:

d_x stvarni promjer kontrolnog prstena na temperaturi 20 °C

d_{ref} promjer referentnog prstena na referentnoj temperaturi

Δl izmjerena razlika promjera kontrolnog i referentnog prstena

δ_{li} korekcija zbog pogreške pokazivanja mjernog uređaja

δ_{lt} korekcija zbog utjecaja temperature

δ_{lp} korekcija zbog nepodešenosti suosnosti mjernih ticala i pravca mjerenja

δ_{lE} korekcija uslijed razlike u elastičnoj deformaciji kontrolnog i referentnog prstena

δ_{lA} korekcija zbog utjecaja Abbeove pogreške

gdje je korekcija δ_T iskazana slijedećim matematičkim modelom:

$$\delta_T = (D_{ref} \cdot (\alpha_{ref} - \alpha_R) - D_X \cdot (\alpha_X - \alpha_{ref})) \cdot \Delta t_A + D_{ref} \cdot \alpha_{ref} \cdot \delta_{t_{ref}} - D_X \cdot \alpha_X \cdot \delta_{t_X} - (D_{ref} - D_X) \cdot \alpha_R \cdot \delta_{t_R} \quad (2)$$

gdje je:

D_X, D_{ref} nazivni promjeri referentnog i kontrolnog prstena

$\alpha_X, \alpha_{ref}, \alpha_R$ koeficijenti temperaturnog rastezanja kontrolnog prstena, referentnog prstena i mjerne skale uređaja

$\Delta t_A = t_A - t_0$ odstupanje temperature okoline od referentne temperature $t_0 = 20$ °C, ($\Delta t_A = \pm 0,5$ °C)

$\delta_{t_X}, \delta_{t_{ref}}, \delta_{t_R}$ odstupanje temperature, kontrolnog prstena, referentnog prstena i mjerne skale uređaja, od temperature okoline, ($\pm 0,1$ °C)

$$\delta_{TA} = (D_{ref} \cdot (\alpha_{ref} - \alpha_R) - D_X \cdot (\alpha_X - \alpha_R)) \cdot \Delta t_A \quad (3)$$

$$\delta_{TS} = D_{ref} \cdot \alpha_{ref} \cdot \delta_{t_{ref}} \quad (4)$$

$$\delta_{TX} = D_X \cdot \alpha_X \cdot \delta_{t_X} \quad (5)$$

$$\delta_{TR} = (D_S - D_X) \cdot \alpha_R \cdot \delta_{t_R} \quad (6)$$

Tablica 4. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti, μm	Koeficijent osjetljivosti, c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm , D u m
$u(d_{ref})$	Umjeravanje promjera ref. prstena	0,10 μm	1	Normalna	0,10
$u(\Delta l)$	Mjerenje razlike promjera ref. i mjernog prstena	0,10 μm	1	Normalna	0,10
$u(\delta l_i)$	Korekcija zbog pogreške pokazivanja mjernog uređaja	$(0,2 + 0,58d_X)$ μm , d u m	1	Pravokutna	$(0,2 + 0,58d_X)$
$u(\delta l_T)$ $u(\delta l_{TA})$ $u(\Delta\alpha) u(\Delta t_A)$ $u(\Delta\alpha)u(\Delta t_A)$ $u(\delta l_{Tref})$ $u(\delta t_{ref})$ $u(\delta t_{ref})u(\alpha_{ref})$ $u(\delta l_{TX})$ $u(\delta t_X)$ $u(\delta t_X)u(\alpha_S)$ $u(\delta l_{TR})$ $u(\delta t_R)$ $u(\delta t_R)u(\alpha_R)$	Temperaturna korekcija	0,236 0,236 0,058°C 0,033 0,058°C 0,033 0,058°C 0,033	1 d_{ref} d_X $d_{ref}\alpha_{ref}$ d_{ref} $d_X\alpha_X$ d_X $(d_{ref}d_X -)\alpha_R$ $d_{ref} - d_X$	Normalna	0,167 d_{ref} 0,167 d_X 0,667 d_{ref} 0,033 d_{ref} 0,667 d_X 0,033 d_X 0,667($d_{ref} - d_X$) 0,033($d_{ref} - d_X$)
δl_p	Koaksijalnost	0	1	Pravokutna	0
δl_E	Korekcija elastične deformacije	0,017 μm	1	Pravokutna	0,017
δl_A	Abbeova pogreška	0,012 μm	1	Pravokutna	0,012
Sastavljena mjerna nesigurnost u_{dx}			$\sqrt{(0,25^2 + 0,81d_X^2 + 0,47d_{ref}^2 + 0,45(d_{ref} - d_X)^2)}$		
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U za $P = 95\%$, $k = 2$			$U = (0,6 + 0,7D) \mu\text{m}$, D u m; $k = 2$, $P = 95\%$		

Proširena mjerna nesigurnost u postupku umjeravanja kontrolnih prstena od 8 mm do 150 mm iznosi:

$$U = (0,6 + 0,7D) \mu\text{m}, D \text{ u m}; k = 2, P = 95\%$$

gdje je D izmjereni promjer prstena.

(7)

2.3. Mjerna metoda sa ticalom i referentnim prstenom

Glavna prednost ove metode u odnosu na metodu sa kontaktnim čeljustima je što se mogu mjeriti duljine unutarnjih promjera manjih od 8 mm.

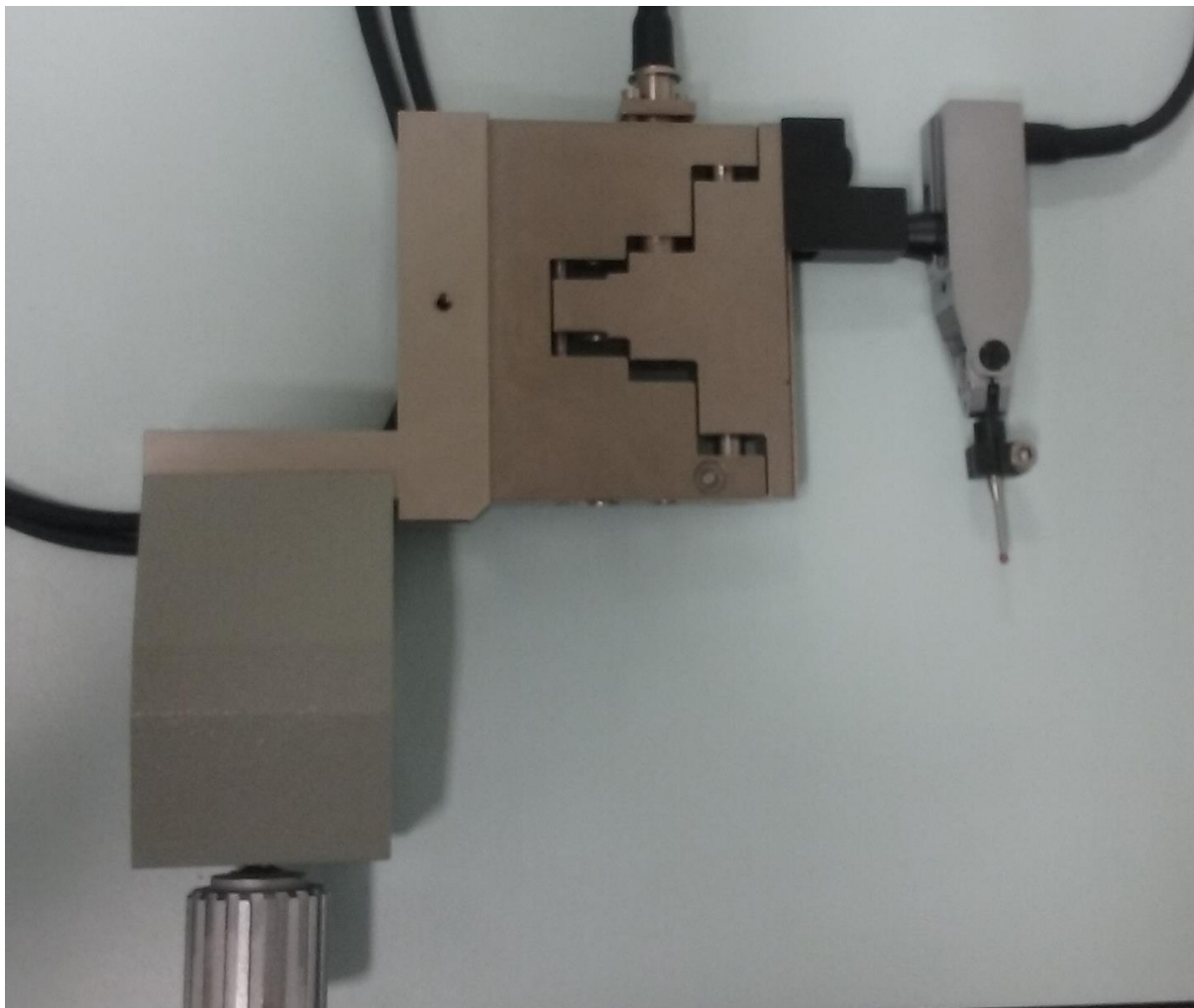
U ovom umjeravanju koriste se:

- univerzalni uređaj DMS 680,
- referentni mjerni prsten \varnothing 13,9991 mm,
- kontrolni mjerni prsten \varnothing 15,997 mm,
- ticalo,
- mjerni sustav ticala,
- digitalni komparator,
- nepomični stolić,
- digitalni termometar sa sondom.

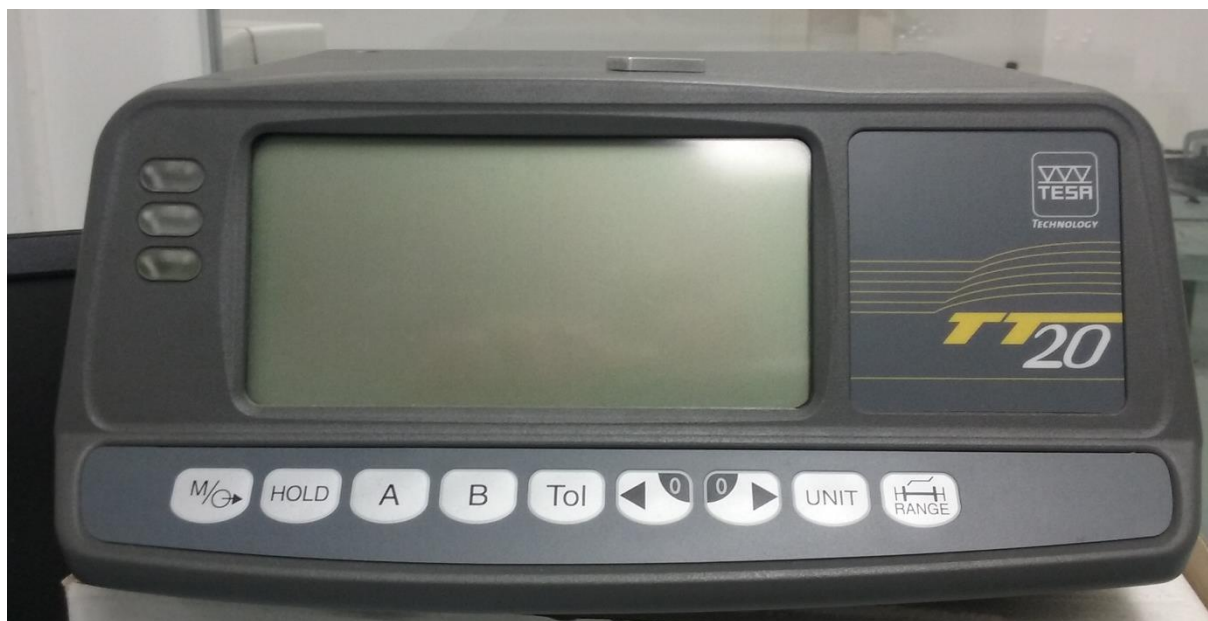
Kod ove mjerne metode umjesto kontaktnih čeljusti koristi se ticalo i dodatna oprema koja uključuje ticalo, mjerni sustav ticala, digitalni komparator TESA TT 200 i nepomični stolić koji su prikazani na Slikama 39., 40., 41. i 42.



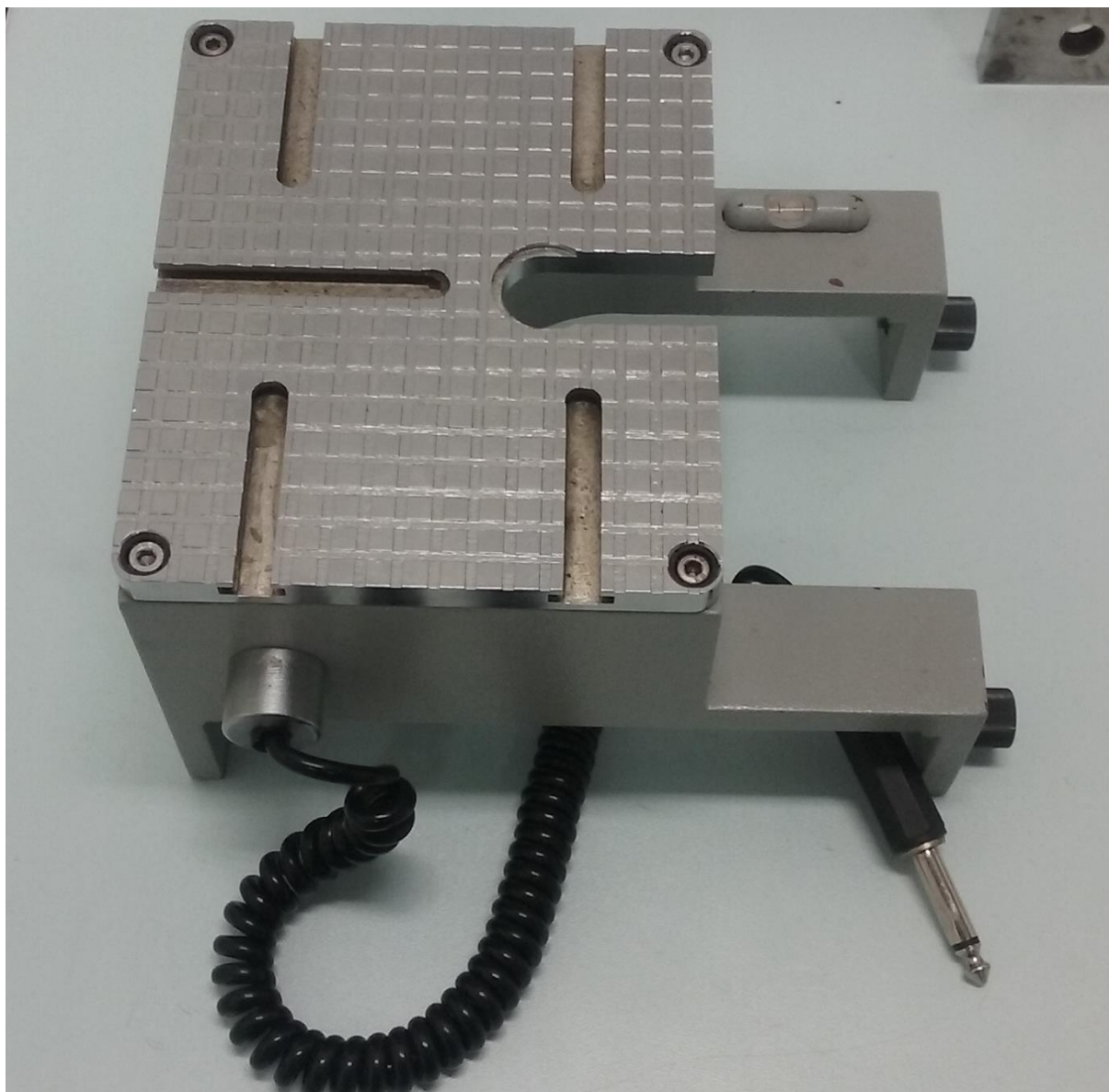
Slika 39. Ticalo



Slika 40. Mjerni sustav ticala



Slika 41. Digitalni komparator TESA TT 200



Slika 42. Nepomični stolić

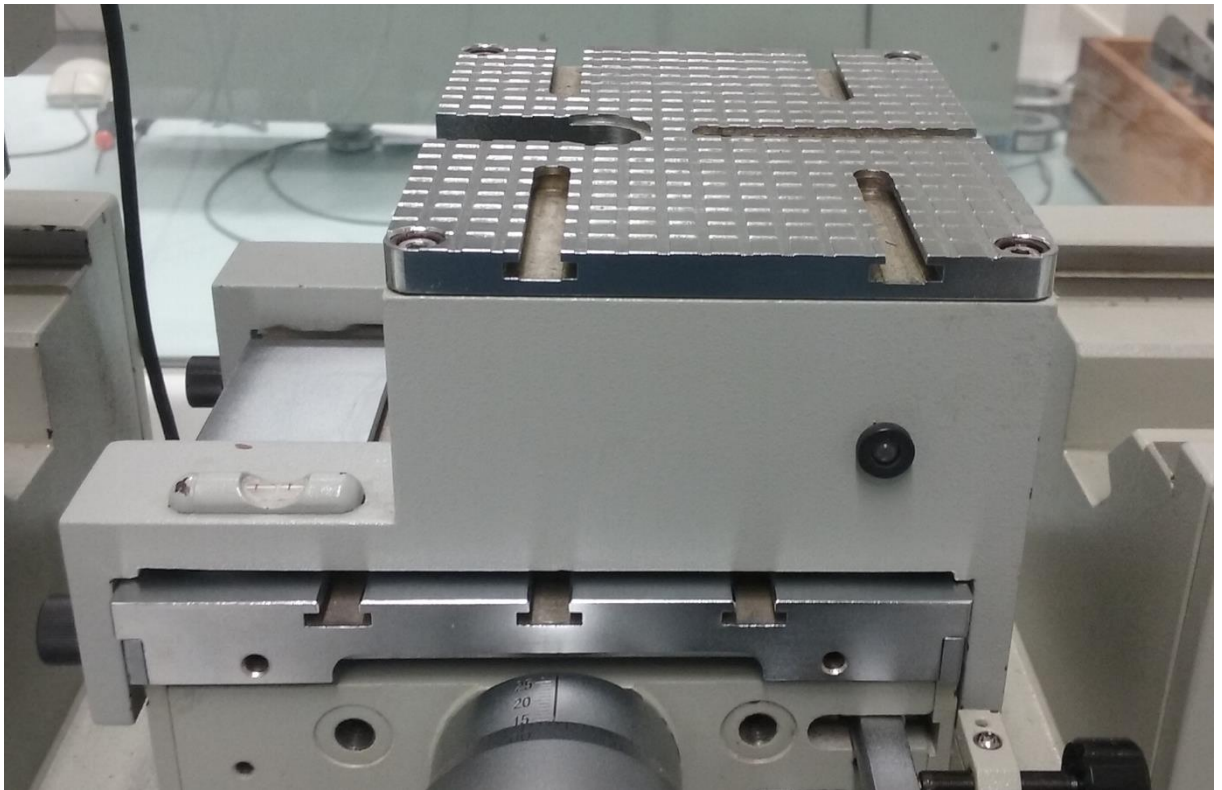
U daljnjem tekstu prikazani su koraci mjerne metode s ticalom i referentnim prstenom u Nacionalnom laboratoriju za duljinu.

Prije provedbe umjeravanja treba provjeriti valjanost certifikata referentnog prstena.

Certifikat za referentni mjerni prsten $\varnothing 13,9991$ mm nalazi se u Prilogu.

Koraci umjeravanja:

1. Mjerne površine mjerila i uređaja treba očistiti i odstraniti masnoću korištenjem medicinskog benzina, pamučne vate i čiste pamučne krpe.
2. Provjeriti postojanje identifikacijskih oznaka (proizvođač, serijski broj, mjerno područje) i stanje mjernih površina (da li su mehanički oštećene ili korodirane). Rezultate ispitivanja prema točkama upisati u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*. U slučaju da prsten ne zadovoljava zahtjeve iz točke 2, postupak umjeravanja se ne provodi. Na Slikama 35., 36. i 37 na str. 28., 29. i 30. prikazana je prazna *Radna podloga LFSB-WR 290*.
3. Umjeravanje provoditi samo u slučaju ako je temperatura okoliša $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$.
4. Prije početka umjeravanja očitati temperaturu referentnog i kontrolnog prstena. Temperature očitati digitalnim termometrom sa sondom, oznaka OST 28-360. Razlika temperatura (ΔT) ne smije biti veća od $0,1\text{ °C}$. Vrijednosti upisati u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*.
5. S obzirom da je umjeravanje unutarnjeg promjera prstena usporedbeno mjerenje, prije početka umjeravanja referentna vrijednost d_{ref} postavlja se pomoću referentnog prstena. gdje je:
 d_{ref} *duljina unutarnjeg promjera referentnog prstena*
Prije same pripreme potrebno je:
 - namjestiti nagib radne ploče u horizontalnu ravninu;
 - namjestiti rotaciju radne ploče oko njenog srednjeg položaja;
 - podesiti poprečno pomicanje (oko Y osi);
 - spustiti radni stol u podređenu poziciju.
6. Na radni stol postavlja se nepomični stolić kako bi se onemogućila translacija u smjeru X - osi radnog stola. Na Slici 43. prikazan je nepomični radni stol.



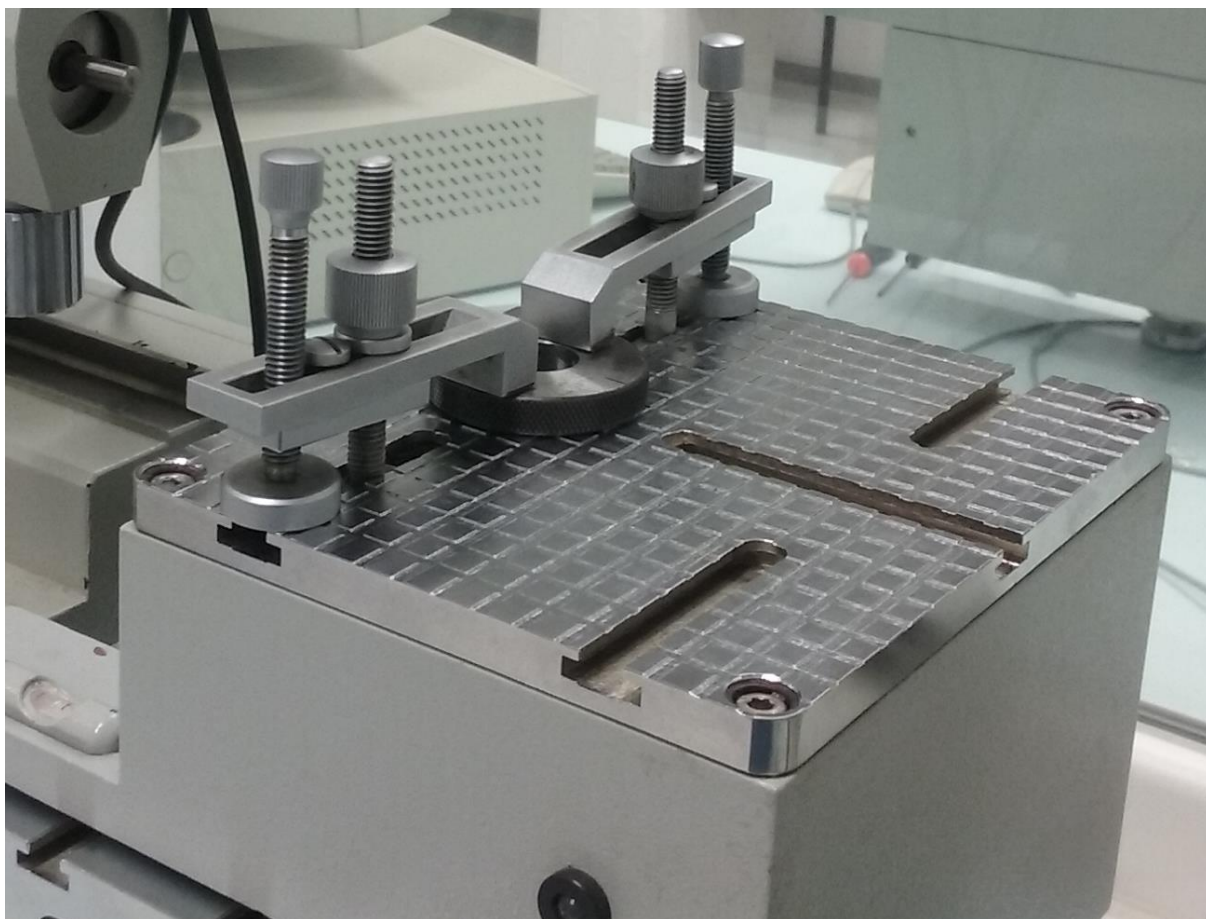
Slika 43. Nepomični radni stol

7. Na pokretnu osovinu učvršćuje se mjerni sustav ticala uključujući ticalo spojeno na digitalni komparator TESA TT 200. Ovaj korak prikazan je na Slici 44.



Slika 44. Postavljeni mjerni sustav ticala

8. Ušice za primjenu mjerne sile ne smiju biti spojene s RAM-om. Provjeriti da se mjerenje odvija bez upotrebe mjerne sile.
9. Postavlja se referentni prsten na nepomični stolić te se isti osigurava od pomicanja sa dva alata za učvršćivanje koji su smješteni jedan nasuprot drugoga. Prije idućeg koraka još jednom se provjerava horizontalnost radnoga stola. Ovaj korak prikazan je na slici 45.



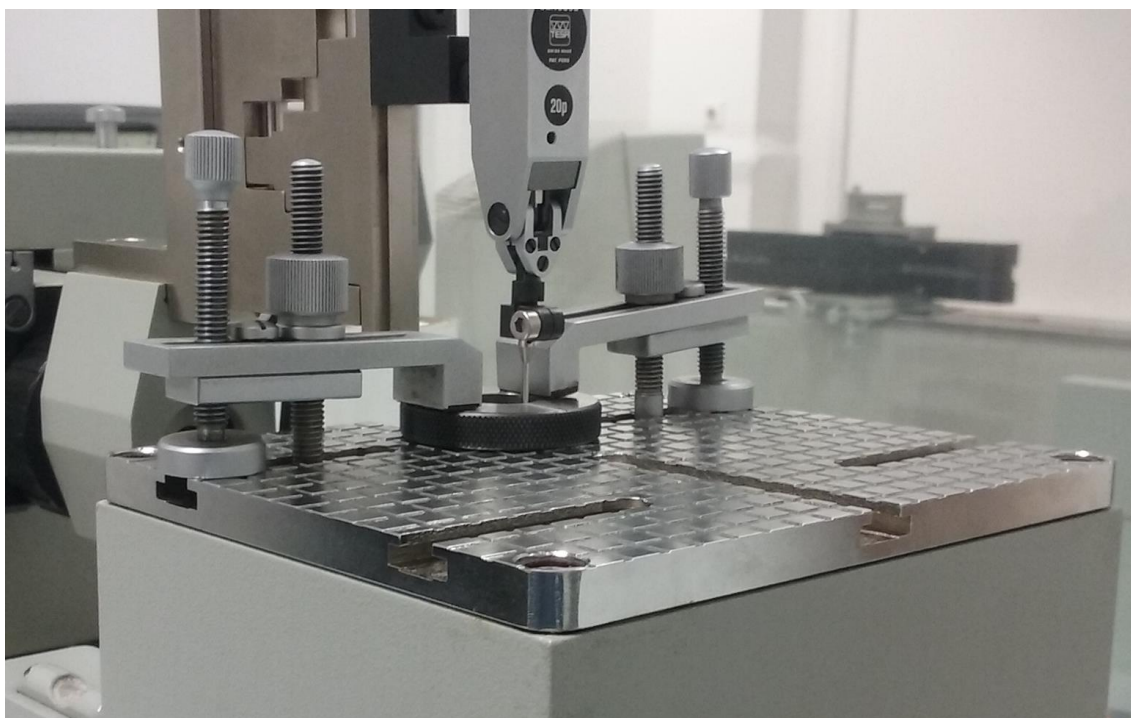
Slika 45. Postavljanje i učvršćivanje referentnog prstena

10. Pozicionira se ticalo iznad unutarnjeg promjera referentnog prstena te se učvršćuje glava uređaja kako je prikazano na Slici 46.



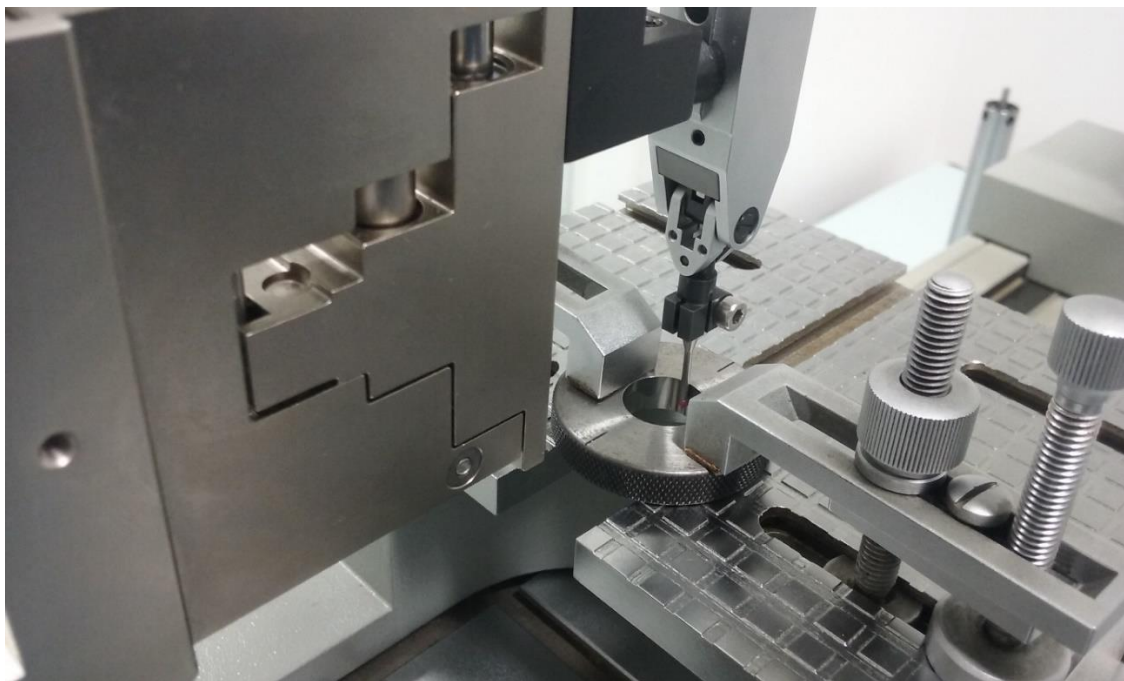
Slika 46. Pozicionirano ticalo iznad unutarnjeg promjera referentnog prstena

- 11.** Podiže se radni stol kako bi ticalo došlo u poziciju unutar referentnog prstena. U ovom koraku treba paziti da ne dođe do sudara ticala i referentnog prstena. Na Slici 47. prikazana je pozicija ticala unutar referentnog prstena.



Slika 47. Pozicija ticala unutar referentnog prstena

12. Otključava se RAM zatvarač, te se ticalo pažljivo dovodi u dodir sa unutarnjom stranom referentnog prstena kako je prikazano na Slici 48.



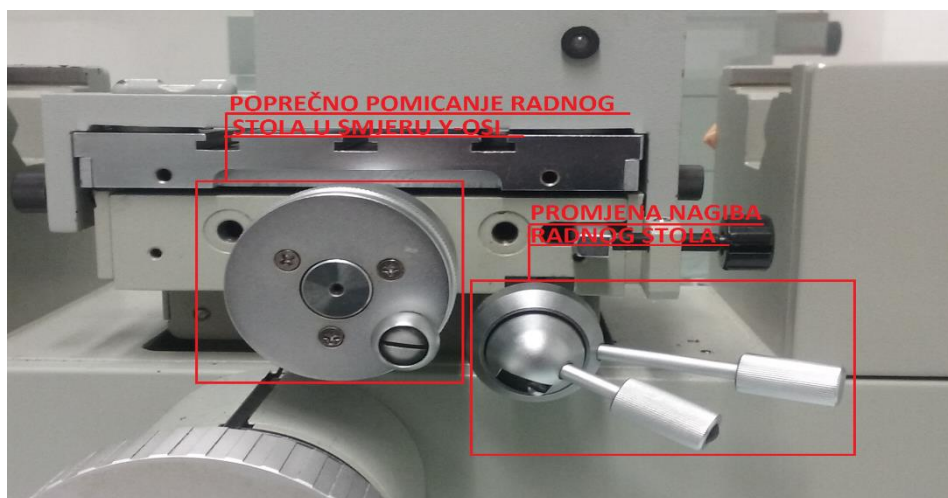
Slika 48. Ticalo u dodiru sa unutarnjom stranom referentnog prstena

13. Stabilizira se ticalo te se ponovo učvršćuje glava uređaja.

14. Nastavlja se pozicioniranje prstena:

- poprečnim pomicanjem radnog stola tražeći maksimalnu prekretnu točku;
- promjenom nagiba radnog stola tražeći minimalnu prekretnu točku;
- ponavljajući poprečno pomicanje i promjenu nagiba radnog stola dok se na računalu ne pokaže odstupanje manje od $0,3 \mu\text{m}$.

Na Slici 49. Prikazani su naznačeni su dijelovi pomoću kojih tražimo prekretnu točku.



Slika 49. Traženje prekretnu točke

15. Nakon ovog koraka potvrđuje se nula na računalu te se pomicanjem ticalo dovodi u dodir sa nasuprotnom unutarnjom stranom referentnog prstena. Dobivena vrijednost upisuje se u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*.

Nakon završetka mjerenja referentnog prstena započinje mjerenje kontrolnog prstena.

Postupak mjerenja kontrolnog prstena djelomično slijedi postupak mjerenja referentnog prstena. Kako bi se izmjerio kontrolni prsten nužno je ponoviti sve korake od **9. do 15. koraka**.

Nakon opisanog postupka na računalu se prikaže duljina unutarnjeg promjera kontrolnog prstena.

Mjerenje promjera kontrolnog prstena treba izvršiti u tri razine i u dva presjeka međusobno zakrenuta za 90° kako je prikazano na Slici 44. na str. 36. Mjerenje promjera potrebno je ponoviti tri puta po razini i dobivene vrijednosti upisati u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*.

Nakon što se izmjere sve tri razine promjera presjeka I-I miče se kontrolni prsten i ponovno se ponavlja mjerenje referentnog prstena kako bi se utvrdilo da nije došlo do promjene prve očitane referentne vrijednosti. Ukoliko je odstupanje unutar 0,1 µm, skida se referentni prsten i postavlja kontrolni prsten radi mjerenja presjeka II-II. Nakon što se izmjeri presjek II-II još jednom se provjerava odstupanje referentnog prstena.

2.3.1. Mjerna nesigurnost metode s ticalom i referentnim prstenom [5]

Uvjeti za izračun matematičkog modela mjerenja i mjerne nesigurnosti su:

- u laboratoriju se održava temperatura $20 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- najveće dopušteno odstupanje u temperaturi između referentnog i kontrolnog prstena iznosi $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- maksimalna dopuštena greška pronalaska prekretno točke iznosi $\pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$,
- maksimalna dopuštena greška za niveliranje iznosi $\pm 0,3 \text{ }\mu\text{m}$,
- razlika u veličini referentnog i kontrolnog prstena ne smije biti veća od 20 mm.

Pretpostavke za izračun matematičkog modela mjerenja i mjerne nesigurnosti su:

$$\Delta T = \frac{T_{ref.P.} + T_{kon.P.}}{2} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (8)$$

- konstanta C je nepromjenjiva sa temperaturom,
- Može se pretpostaviti da razlika u mjeri promjera na $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i na stvarnoj temperaturi nije značajna. S obzirom da produljenje uslijed temperature ovisi o promjeru može se smatrati da vrijede sljedeće jednakosti:

$$\alpha \cdot \Delta T_x \cdot d_{x,20^{\circ}\text{C}} \cong \alpha \cdot \Delta T_x \cdot d_x, \quad (9)$$

$$\alpha \cdot \Delta T_{ref} \cdot dD_{ref,20^{\circ}\text{C}} \cong \alpha \cdot \Delta T_{ref} \cdot d_{ref}, \quad (10)$$

- za razliku u temperaturi od $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i duljini od 20 mm između referentnog i kontrolnog prstena najveće produljenje iznosi:

$$\delta_{\Delta T,l} = (d_x - d_{ref}) \cdot \alpha \cdot \Delta T_{0,1} = 2,2 \text{ nm}. \quad (11)$$

gdje je:

$T_{ref.P.}$ temperatura referentnog prstena

$T_{kon.P.}$ temperatura kontrolnog prstena

α koeficijent toplinskog istezanja [$1/^{\circ}\text{C}$]

$\delta_{\Delta T,l}$ korekcija zbog odstupanja u temp. od $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i duljini od 20mm između prstena

$\Delta T_{0,1}$ razlika u temperaturi od $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ između prstena

Proračun za iskazivanje mjerne nesigurnosti.

- Matematički model mjerenja.

$$d_x = d_{ref} + d_p - d_r - \alpha \cdot \Delta T \cdot (d_p - d_r) - (\delta_{Nr} + \delta_{pTr} + \delta_{OTr}) + \delta_{Np} + \delta_{pTp} + \delta_{OTp} + \delta_{\Delta T,l} \quad (12)$$

gdje je:

d_x	stvarni promjer kontrolnog prstena na temperaturi 20 °C
d_{ref}	promjer referentnog prstena na temperaturi 20 °C
d_p	izmjereni promjer kontrolnog prstena
d_r	izmjereni promjer kontrolnog prstena
ΔT	odstupanje temperature okoline od referentne temperature 20 °C, ($\Delta T = \pm 0,5$ °C)
δ_{Nr}	korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja referentnog prstena
δ_{Np}	korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja kontrolnog prstena
δ_{PTr}	korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretno točke ref. prstena
δ_{PTp}	korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretno točke k. prstena
δ_{OTr}	korekcija zbog odstupanja otklona ticala kod referentnog prstena
δ_{OTp}	korekcija zbog odstupanja otklona ticala kod kontrolnog prstena
$\delta_{\Delta T, l}$	korekcija zbog odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C i duljini od 20mm između prstena

- Mjerna nesigurnost metode [5]

$$u^2(d_x) = u^2(d_p) \cdot C_{dp}^2 + u^2(d_r) \cdot C_{dr}^2 + u^2(d_{ref}) \cdot C_{ref}^2 + u^2(\alpha) \cdot C_{\alpha}^2 + u^2(\Delta T) \cdot C_{\Delta T}^2 + u^2(\delta_{Np}) \cdot C_{\delta_{Np}}^2 + u^2(\delta_{Nr}) \cdot C_{\delta_{Nr}}^2 + u^2(\delta_{PTp}) \cdot C_{\delta_{PTp}}^2 + u^2(\delta_{PTr}) \cdot C_{\delta_{PTr}}^2 + u^2(\delta_{OTp}) \cdot C_{\delta_{OTp}}^2 + u^2(\delta_{OTr}) \cdot C_{\delta_{OTr}}^2 + u^2(\delta_{\Delta T, l}) \cdot C_{\delta_{\Delta T, l}}^2$$

gdje je:

$u(d_x)$	mjerna nesigurnost stvarnog promjera kontrolnog prstena
$u(d_{ref})$	mjerna nesigurnost referentnog prstena
$u(d_p)$	mjerna nesigurnost izmjerenog promjera kontrolnog prstena
$u(d_r)$	mjerna nesigurnost izmjerenog promjera referentnog prstena
$u(\Delta T)$	mjerna nesigurnost utjecaja temperature
$u(\delta_N)$	mjerna nesigurnost procesa niveliranja
$u(\delta_{PT})$	mjerna nesigurnost traženja prekretno točke
$u(\delta_{OT})$	mjerna nesigurnost otklona ticala
$u(\delta_{\Delta T, l})$	mjerna nesigurnost odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C između prstena
C_i	koeficijent osjetljivosti

Derivacije koeficijenata osjetljivosti:

$$C_{\delta Np} = C_{\delta Nr} = C_{\delta PTp} = C_{\delta PT r} = C_{\delta OTp} = C_{\delta OT r} = C_{\delta \Delta T, l} = 1 \quad (13)$$

$$C_{dp} = 1 - \alpha \cdot \Delta T \quad (14)$$

$$C_{dr} = -1 + \alpha \cdot \Delta T \quad (15)$$

$$C_{dref} = 1 \quad (16)$$

$$C_{\alpha} = \Delta T(d_p - d_r) = 0 \quad (17)$$

$$C_{\Delta T} = \alpha(d_p - d_r) = \alpha(d_x - d_{ref}) = \alpha \cdot \Delta d \quad (18)$$

Mjerna nesigurnost pojedinih članova [5]:

Za izmjereni promjer kontrolnog i referentnog prstena uzima se odstupanje od $\pm 0,1 \mu m$ iz certifikata umjeravanja uređaja DMS 680.

$$u(d_p) = u(d_r) = \frac{0,1 \mu m}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu m \quad (19)$$

Za referentni prsten mjerna nesigurnost se uzima iz certifikata umjeravanja kontrolnih prstena.

$$U(d_{ref}) = (0,6 + 0,7D_{ref}) \mu m, D_{ref} \text{ u m}; k = 2, P = 95\% \quad (20)$$

$$u(d_{ref}) = (0,3 + 0,35D_{ref}) \mu m, D_{ref} \text{ u m} \quad (21)$$

Ako je najveća razlika između promjera kontrolnog prstena i referentnog jednaka 20 mm i najveće odstupanje temperature referentnog od kontrolnog prstena $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ najveće produljenje zbog razlike u temperaturi iznosi 2,2 nm . Uz pretpostavku pravokutne razdiobe ova sastavnica mjerne nesigurnosti je:

$$u(\delta_{\Delta T, l}) = \frac{2,2 \text{ nm}}{\sqrt{3}} = 0,001 \mu m \quad (22)$$

Za mjernu nesigurnost utjecaja okolišne temperature uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$u(\Delta T) = \frac{0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (23)$$

Za mjernu nesigurnost niveliranja referentnog prstena uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{Nr}) = \frac{0,3 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,173 \mu\text{m} \quad (24)$$

Za mjernu nesigurnost niveliranja kontrolnog prstena uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{Np}) = \frac{0,3 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,173 \mu\text{m} \quad (25)$$

Za mjernu nesigurnost traženja prekretno točke referentnog prstena uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{pTr}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (26)$$

Za mjernu nesigurnost traženja prekretno točke kontrolnog prstena uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{pTp}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (27)$$

Za utjecaj otklona ticala referentnog prstena uzima se rezolucija digitalnog komparatora od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{oTr}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (28)$$

Za utjecaj odklona ticala kontrolnog prstena uzima se rezolucija digitalnog komparatora od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{OTp}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (29)$$

Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja metode sa ticalom i referentnim etalonom dane su u Tablici 5.

Tablica 5. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja

Sastavni ca standard ne mjerne nesigurn osti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti	Koeficijent osjetljivosti, c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm , D u m
$u(d_{ref})$	Mjerna nesigurnost ref. prstena	$(0,3 + 0,35D) \mu\text{m}$, D u m; $k=2$, $P=95\%$	1	Normalna	$0,3 + 0,35d_{ref}$
$u(d_p)$	Korekcija izmjenog promjera kontrolnog prstena	$0,0577 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(d_r)$	Korekcija izmjenog promjera referentnog prstena	$0,0577 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(\Delta T)$	Korekcija zbog odstupanja temp. okoline od ref. temp. 20°C	$0,29^\circ\text{C}$	$11 \cdot \Delta d$ Δd u m	Pravokutna	$3,19 \cdot \Delta d$
$u(\delta_{Nr})$	Korekcija zbog odstupanja u niveliranju ref. prstena	$0,1732 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,173
$u(\delta_{Np})$	Korekcija zbog odstupanja u niveliranju kont. prstena	$0,1732 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,173
$u(\delta_{PTr})$	Korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretne točke ref. prstena	$0,0577 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(\delta_{PTp})$	Korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretne točke kon. prstena	$0,0577 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058

$u(\delta_{OTr})$	Korekcija zbog odstupanja odklonitica ref. prstena	0,0577 μm	1	Pravokutna	0,058
$u(\delta_{OTp})$	Korekcija zbog odstupanja odklonitica kon. prstena	0,0577 μm	1	Pravokutna	0,058
$u(\delta_{\Delta T,l})$	Korekcija zbog odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C i duljini od 20 mm između prstena	1 nm	1	Pravokutna	0,001
Sastavljena mjerna nesigurnost $u(d_x)$			$\sqrt{0,08 + (0,3 + 0,35 \cdot d_{ref})^2 + 10,17 \cdot \Delta d^2}$		
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U za $k = 2$, $P = 95\%$			$U(d_x) = u(d_x) \cdot 2$		

2.4. Mjerna metoda sa ticalom i planparalelnom graničnom mjerkom

Glavna prednost ove metode u odnosu na metodu sa kontaktnim čeljustima i metodu sa ticalom i referentnim prstenom je što Laboratorij ne mora umjeravati etalonske prstene u vanjskim laboratorijima već se koriste planparalelne granične mjerke koje su umjerene unutar Laboratorija. Također se ovom metodom mogu mjeriti duljine unutarnjih promjera manjih od 8 mm.

U ovom umjeravanju koriste se:

- univerzalni uređaj DMS 680,
- planparalelna granična mjerka 16 mm,
- kontrolni mjerni prsten Ø15,997 mm,
- ticalo,
- mjerni sustav ticala,
- digitalni komparator,
- nepomični stolić,
- malo rotacijsko postolje,
- digitalni termometar sa sondom.

Kod ove metode koristi se sva oprema kao kod metode sa ticalom i referentnim prstenom osim referentnog prstena kojeg zamjenjuje planparalelna granična mjerka nazivne duljine 16 mm i malog rotacijskog postolja. Isti su prikazani na Slikama 50. i 51.



Slika 50. Planparalelna granična mjerka nazivne duljine 16 mm

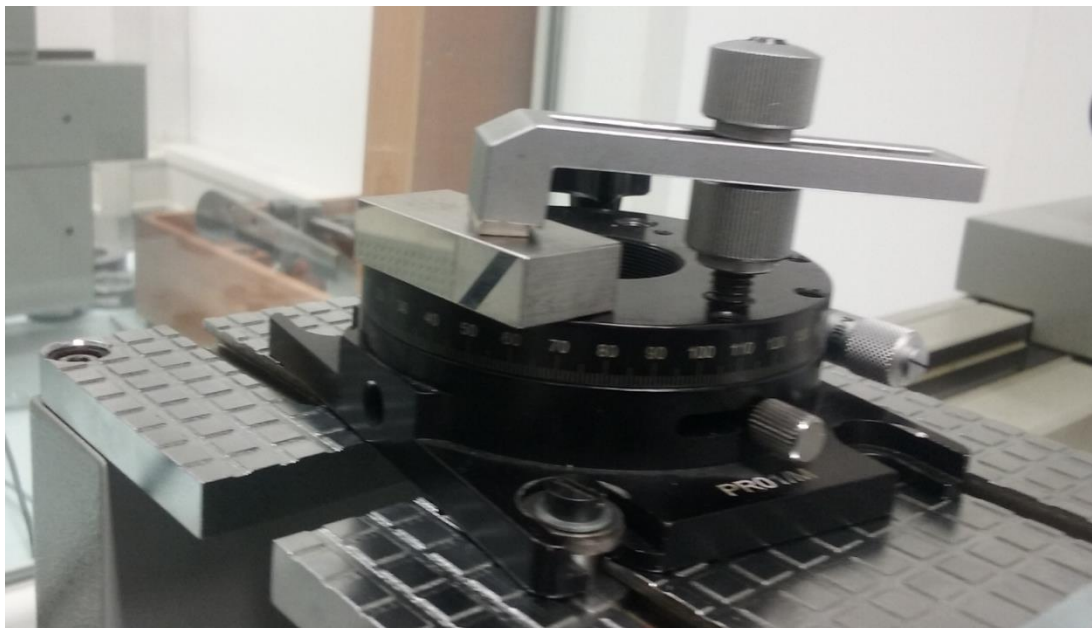


Slika 51. Malo rotacijsko postolje

U daljnjem tekstu neće se dati koraci umjeravanja jer je se sama priprema metode i dio u kojem se mjeri kontrolni prsten ni po čemu ne razlikuju od metode sa ticalom i referentnim prstenom. Stoga će se navesti samo razlike umjeravanja metode sa ticalom i planparalelnom graničnom mjerkom zbog smanjenja redundancije teksta te boljeg prikaza bitnih dijelova metode koji omogućuju njenu izvodljivost.

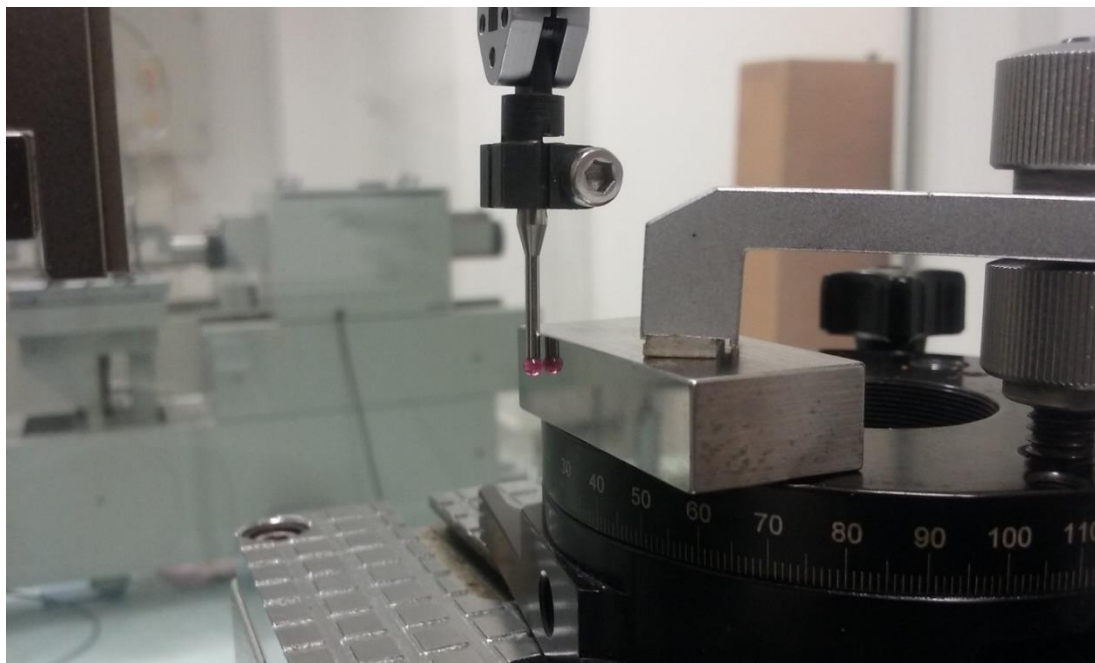
Bitni dijelovi metode koji se ujedno i razlikuju od metode sa referentnim prstenom:

- Prije provedbe umjeravanja treba provjeriti valjanost certifikata planparalelne granične mjerke. Certifikat za planparalelnu graničnu mjerku 16 mm nalazi se u Prilogu.
- Na nepomični radni stol postavlja se malo rotacijsko postolje koje omogućuje rotaciju etalona oko Z osi kako bi se ukoliko se radi o etalonu pravokutnog oblika isti postavio paralelno sa Y osi uređaja. U ovoj metodi koristi se planparalelna granična mjerka koja je pričvršćena sa alatom za učvršćivanje na malo rotacijsko postolje kako je prikazano na Slici 52.



Slika 52. Pričvrščena planparalelna granična mjerka na malo rotacijsko postolje

- Otključava se RAM zatvarač te se ticalo lagano dovodi u dodir sa planparalelnom graničnom mjerkom kako je prikazano na Slici 53.

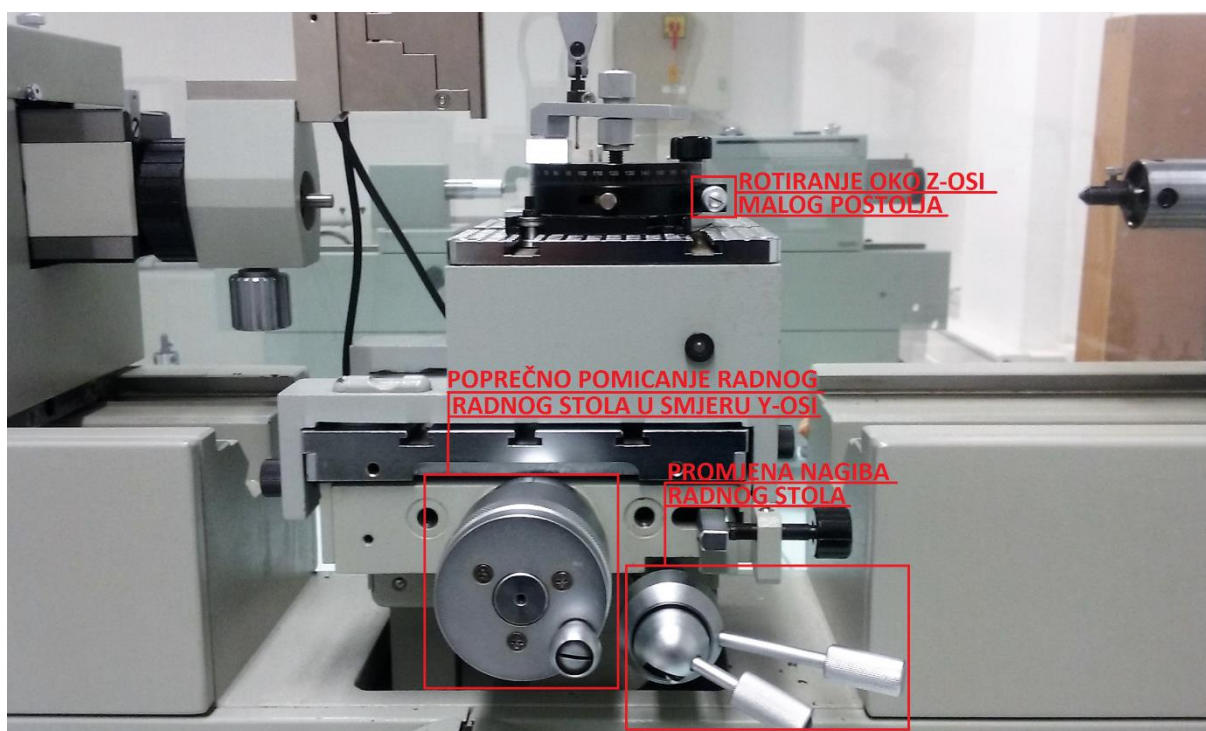


Slika 53. Ticalo u dodiru sa planparalelnom graničnom mjerkom

- Očitavanje ticala se dovodi na nulu te se ponovo učvršćuje glava uređaja.

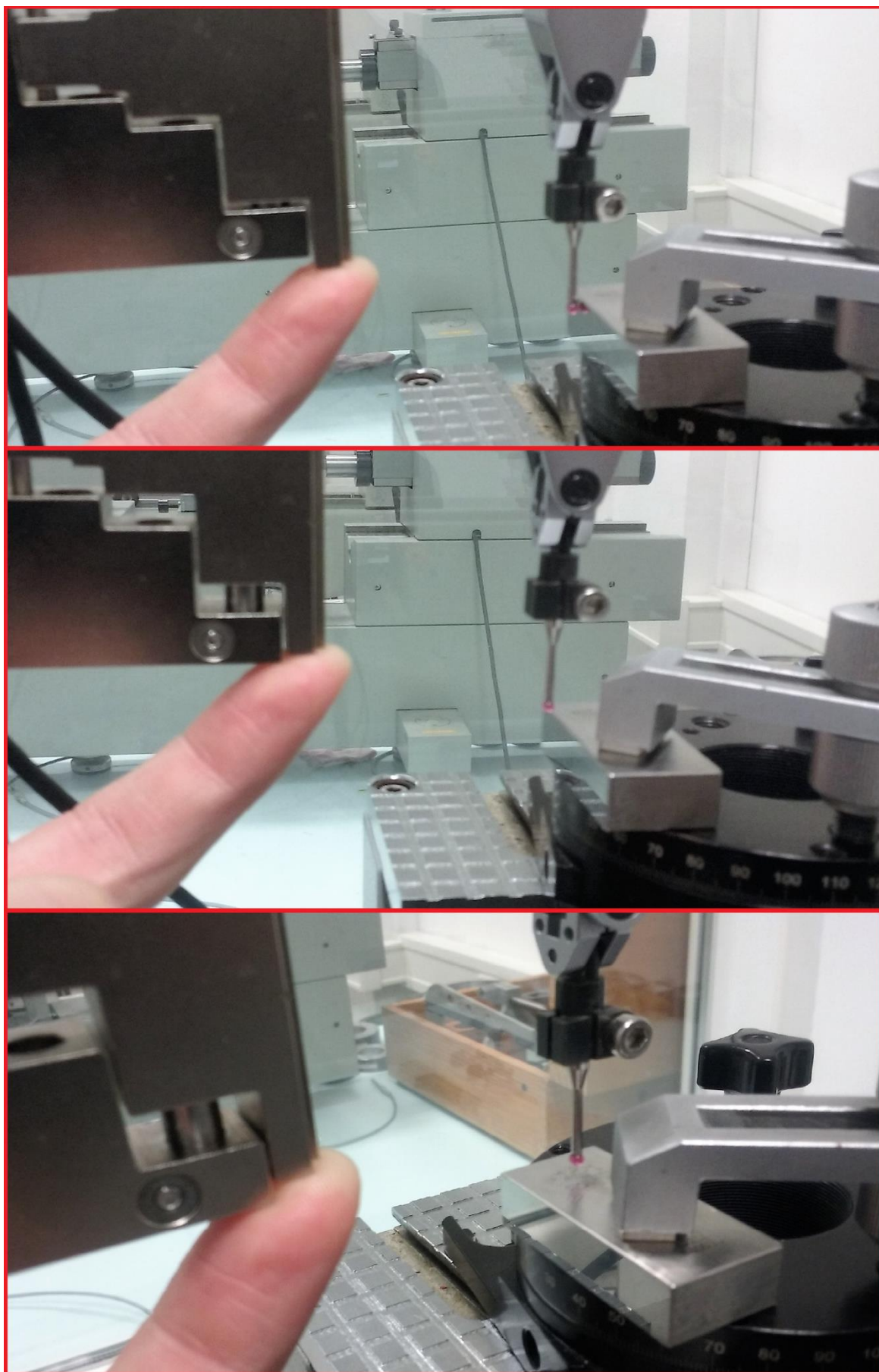
- Nastavlja se pozicioniranje planparalelne granične mjerke :
 - poprečnim pomicanjem radnog stola i pomicanjem malog rotacionog postolja oko njegove Z-osi tražeći poziciju sa minimalnim odstupanjem paralelnosti Y-osi mjerke i uređaja;
 - promjenom nagiba radnog stola izvodi se niveliranje oko Y-osi;
 - ponavljajući gore navedene radnje dok se na računalu ne pokaže odstupanje od $0,3 \mu\text{m}$.

Na Slici 54. prikazani su naznačeni su dijelovi pomoću kojih pozicioniramo planparalelnu graničnu mjerku.



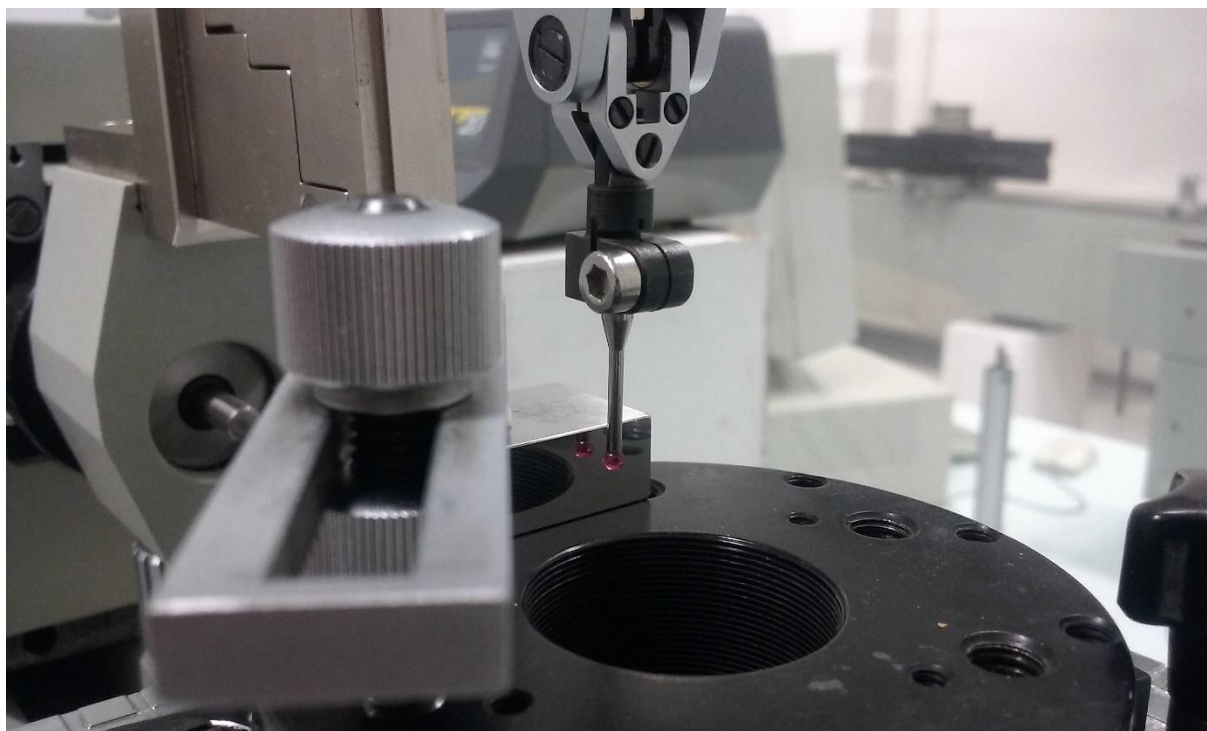
Slika 54. Pozicioniranje planparalelne granične mjerke

- Nakon pozicioniranja planparalelne granične mjerke postavlja se nula na računalu te se ručno podiže dio mjernog sustava ticala kako bi se ticalo translato na drugu stranu mjerke kako je prikazano na Slici 55. Praksa je pokazala da je ovo najbolji način translacije ticala koji rezultira sa maksimalnim odstupanjem od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.



Slika 55. Translacija ticala

- Ticalo se dovodi u dodir s drugom stranom mjerke kako je prikazano na Slici 56. Dobivena vrijednost upisuje se u *Radnu podlogu LFSB-WR 290*.



Slika 56. Ticalo u poziciji za uzimanje mjere

2.4.1. Mjerna nesigurnost metode sa ticalom i planparalelnom graničnom mjerkom

Uvjeti za izračun matematičkog modela mjerenja i mjerne nesigurnosti su:

- u laboratoriju se održava temperatura $20 \pm 0,5$ °C,
- najveće dopušteno odstupanje u temperaturi između mjerke i kontrolnog prstena iznosi $\pm 0,1$ °C,
- najveće dopušteno odstupanje poprečnog pomicanjem radnog stola i pomicanja malog rotacijskog postolja oko njegove Z-osi zbog nalaženja pozicije sa minimalnim odstupanjem paralelnosti Y-osi mjerke i uređaja je $\pm 0,3$ μm,
- najveće dopušteno odstupanje za niveliranje iznosi $\pm 0,3$ μm,
- razlika u veličini mjerke i kontrolnog prstena ne smije biti veća od 20 mm,
- planparalelna granična mjerka uvijek mora biti veća od unutarnjeg promjera kontrolnog prstena.

Pretpostavke za izračun matematičkog modela mjerenja i mjerne nesigurnosti su:

$$\bullet \quad \Delta T = \frac{T_{mjerke} + T_{kon.P.}}{2} - T_{20^{\circ}\text{C}}, \quad (30)$$

- konstanta C je nepromjenjiva sa temperaturom,

$$\bullet \quad \alpha \cdot \Delta T_x \cdot d_{x,20^{\circ}\text{C}} \cong \alpha \cdot \Delta T_x \cdot d_x, \quad (31)$$

$$\bullet \quad \alpha \cdot \Delta T_{ref} \cdot L_{ref,20^{\circ}\text{C}} \cong \alpha \cdot \Delta T_{ref} \cdot L_{ref}, \quad (32)$$

- za razliku u temperaturi od $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ i duljini od 20 mm između mjerke i kontrolnog prstena najveće produljenje iznosi:

$$\delta_{\Delta T,l} = (L_{ref} - d_x) \cdot \alpha \cdot \Delta T_{0,1} = 2,2 \text{ nm} . \quad (33)$$

gdje je:

T_{mjerke} temperatura mjerke

$T_{kon.P.}$ temperatura kontrolnog prstena

α koeficijent toplinskog istezanja [$1/^{\circ}\text{C}$]

$\delta_{\Delta T,l}$ korekcija zbog odstupanja u temp. od $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ i duljini od 20mm između prstena i mjerke

$\Delta T_{0,1}$ razlika u temperaturi od $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ između prstena i mjerke

Proračun za iskazivanje mjerne nesigurnosti.

- Matematički model mjerenja.

$$d_X = -L_{ref} + d_p + L_m + \alpha \cdot \Delta T \cdot (L_m - d_p) - (\delta_{Nm} + \delta_{Ym} + \delta_{OTm}) + \delta_{Np} + \delta_{PTp} + \delta_{OTp} + \delta_{\Delta T,l} + \delta_p \quad (34)$$

gdje je:

d_X stvarni promjer kontrolnog prstena na temperaturi 20°C

L_{ref} duljina mjerke na temperaturi 20°C

d_p izmjereni promjer kontrolnog prstena

L_m izmjereni duljina mjerke

ΔT odstupanje temperature okoline od referentne temperature 20°C , ($\Delta T = \pm 0,5^{\circ}\text{C}$)

δ_{Nm} korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja mjerke

δ_{Np} korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja kontrolnog prstena

δ_{Ym} korekcija zbog nalaženja pozicije sa minimalnim odstupanjem paralelnosti Y-osi mjerke i uređaja

δ_{PTp} korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretna točke k. prstena

δ_{OTm} korekcija zbog odstupanja otklona ticala kod mjerke

δ_{OTp} korekcija zbog odstupanja otklona ticala kod kontrolnog prstena

$\delta_{\Delta T,l}$ korekcija zbog odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C i duljini od 20mm između prstena i mjerke

δ_p korekcija zbog odstupanja kod ponovljivosti mjerenja

- Mjerna nesigurnost metode [5]

$$u^2(d_x) = u^2(d_p) \cdot C_{dp}^2 + u^2(L_m) \cdot C_{Lm}^2 + u^2(L_{ref}) \cdot C_{Lref}^2 + u^2(\alpha) \cdot C_{\alpha}^2 + u^2(\Delta T) \cdot C_{\Delta T}^2 + u^2(\delta_{Np}) \cdot C_{\delta Np}^2 + u^2(\delta_{Nm}) \cdot C_{\delta Nm}^2 + u^2(\delta_{PTp}) \cdot C_{\delta PTp}^2 + u^2(\delta_{Ym}) \cdot C_{\delta Ym}^2 + u^2(\delta_{OTp}) \cdot C_{\delta OTp}^2 + u^2(\delta_{OTm}) \cdot C_{\delta OTm}^2 + u^2(\delta_{\Delta T,l}) \cdot C_{\delta \Delta T,l}^2 + u^2(\delta_p) \cdot C_{\delta p}^2 \quad (35)$$

gdje je:

$u(d_x)$ mjerna nesigurnost stvarnog promjera kontrolnog prstena

$u(L_{ref})$ mjerna nesigurnost mjerke

$u(d_p)$ mjerna nesigurnost izmjerenog promjera kontrolnog prstena

$u(L_m)$ mjerna nesigurnost izmjerene duljine mjerke

$u(\Delta T)$ mjerna nesigurnost utjecaja temperature

$u(\delta_N)$ mjerna nesigurnost procesa niveliranja

$u(\delta_{PT})$ mjerna nesigurnost traženja prekretno točke

$u(\delta_{OT})$ mjerna nesigurnost otklona ticala

mjerna nesigurnost nalaženja pozicije sa minimalnim odstupanjem paralelnosti

$u(\delta_{Ym})$ Y-osi mjerke i uređaja

$u(\delta_{\Delta T,l})$ mjerna nesigurnost odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C između prstena i mjerke

$u(\delta_p)$ mjerna nesigurnost ponovljivosti mjerenja

C_i koeficijent osjetljivosti

Derivacije koeficijenata osjetljivosti:

$$C_{\delta Np} = C_{\delta Nm} = C_{\delta PTp} = C_{\delta Ym} = C_{\delta OTp} = C_{\delta OTm} = C_{\delta \Delta T,l} = C_{\delta p} = 1 \quad (35)$$

$$C_{dp} = 1 + \alpha \cdot \Delta T \quad (36)$$

$$C_{Lm} = 1 - \alpha \cdot \Delta T \quad (37)$$

$$C_{Lref} = 1 \quad (38)$$

$$C_{\alpha} = \Delta T(d_p - L_m) = 0 \quad (39)$$

$$C_{\Delta T} = \alpha(d_p - L_m) = -\alpha(d_x - L_{ref}) = -\alpha \cdot \Delta \quad (40)$$

Mjerna nesigurnost pojedinih članova [5]:

Za izmjereni promjer kontrolnog prstena i mjerke uzima se greška od $\pm 0,1 \mu\text{m}$ iz certifikata umjeravanja uređaja DMS 680.

$$u(d_p) = U(L_m) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (41)$$

Za mjerku mjerna nesigurnost se uzima iz certifikata umjeravanja planparalelnih graničnih mjerki.

$$U(L_{ref}) = (0,05 + 1,1L_{ref}) \mu\text{m}, L_{ref} \text{ u m}; k = 2, P = 95\% \quad (42)$$

$$u(L_{ref}) = (0,025 + 0,55L_{ref}) \mu\text{m}, L_{ref} \text{ u m} \quad (43)$$

Ako je najveća razlika između promjera kontrolnog prstena i referentne planparalelne granične mjerke jednaka 20 mm i najveće odstupanje temperature mjerke od temperature prstena $\pm 0,1^\circ\text{C}$ najveće produljenje zbog razlike u temperaturi iznosi 2,2 nm. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe ova sastavnica mjerne nesigurnosti je:

$$u(\delta_{\Delta T, l}) = \frac{2,2 \text{ nm}}{\sqrt{3}} = 0,001 \mu\text{m} \quad (44)$$

Za mjernu nesigurnost utjecaja okolišne temperature uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

$$u(\Delta T) = \frac{0,5^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,29^\circ\text{C} \quad (45)$$

Za mjernu nesigurnost niveliranja mjerke uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{Nm}) = \frac{0,3 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,173 \mu\text{m} \quad (46)$$

Za mjernu nesigurnost niveliranja kontrolnog prstena uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{Np}) = \frac{0,3 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,173 \mu\text{m} \quad (47)$$

Za mjernu nesigurnost traženja prekretna točke kontrolnog prstena uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{PTp}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (48)$$

Za mjernu nesigurnost nalaženja pozicije sa minimalnim odstupanjem paralelnosti Y-osi mjerke i uređaja uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{Ym}) = \frac{0,3 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,173 \mu\text{m} \quad (49)$$

Za grešku unutar formule mjerne nesigurnosti otklona ticala mjerke uzima se rezolucija digitalnog komparatora od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{OTm}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (50)$$

Za grešku unutar formule mjerne nesigurnosti otklona ticala kontrolnog prstena uzima se rezolucija digitalnog komparatora od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$(\delta_{OTp}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (51)$$

Za mjernu nesigurnost ponovljivosti rezultata mjerke uzima se najveće odstupanje od $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

$$u(\delta_{Pm}) = \frac{0,1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m} \quad (52)$$

Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja metode sa ticalom i referentnim etalonom dane su u Tablici 6.

Tablica 6. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti	Koeficijent osjetljivosti, c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm , L u m
$u(L_{ref})$	Mjerna nesigurnost mjerke	$(0,025 + 0,55L) \mu\text{m}$, L u m ; $k=2$, $P=95\%$	1	Normalna	$0,025 + 0,55L_{ref}$
$u(d_p)$	Korekcija izmjerenog promjera kont. prstena	$0,058 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(L_m)$	Korekcija izmjerene duljine mjerke	$0,058 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(\Delta T)$	Korekcija zbog odstupanja temp. okoline od ref. temp. 20°C	$0,289 \mu\text{m}$	$-11 \cdot \Delta l$	Pravokutna	$-11 \cdot \Delta l$
$u(\delta_{Nm})$	Korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja mjerke	$0,173 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,173
$u(\delta_{Np})$	Korekcija zbog odstupanja u procesu niveliranja kon. prstena	$0,173 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,173
$u(\delta_{pTp})$	Korekcija zbog odstupanja u procesu traženja prekretno točke kon. prstena	$0,058 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(\delta_{OTm})$	Korekcija zbog odstupanja odklona ticala mjerke	$0,058 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(\delta_{OTp})$	Korekcija zbog odstupanja odklona ticala kon. prstena	$0,058 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,058
$u(\delta_{\gamma m})$	Korekcija zbog nalaženja pozicije sa minimalnim odstupanjem paralelnosti Y-osi mjerke i uređaja	$0,173 \mu\text{m}$	1	Pravokutna	0,173

$u(\delta_{\Delta T, l})$	Korekcija zbog odstupanja u temp. od $\pm 0,1$ °C i duljini od 20 mm između prstena	0,001 nm	1	Pravokutna	0,001
$u(\delta_{pm})$	Korekcija zbog ponovljivosti mjerenja mjerke	0,058 μm	1	Pravokutna	0,058
Sastavljena mjerna nesigurnost $u(d_x)$			$\sqrt{0,11 + (0,025 + 5,5 \cdot L_{ref})^2 + 10,17 \cdot \Delta l^2}$		
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U za $k = 2$, $P = 95\%$			$U(d_x) = u(d_x) \cdot 2$		

3 Usporedba rezultata mjerenja kontrolnog prstena Ø15,997 mm

U ovom poglavlju dani su rezultati mjerenja sve tri metode kontrolnog prstena Ø15,997 mm.

Kontrolni prsten mjeren je u dva presjeka na tri različite visine.

Mjerne nesigurnosti izračunate su za sve tri metode prema izrazima za proširenu mjernu nesigurnost:

- Za mjerne čeljusti:

$$U = 0,6 + 0,7 \cdot D = 0,6 + 0,7 \cdot 0,016 = 0,61 \mu m$$

- Za Ticalo i referentni prsten:

$$U = 2 \cdot \sqrt{0,08 + (0,3 + 0,35 \cdot d_{ref})^2 + 10,17 \cdot \Delta d^2} = 2 \cdot \sqrt{0,08 + (0,3 + 0,35 \cdot 0,014)^2 + 10,17 \cdot 0,002^2} = 0,83 \mu m$$

- Za Ticalo i planparalelnu graničnu mjerku:

$$U = 2 \cdot \sqrt{0,11 + (0,025 + 5,5 \cdot L_{ref})^2 + 10,17 \cdot \Delta l^2} = 2 \cdot \sqrt{0,11 + (0,025 + 5,5 \cdot 0,016)^2 + 10,17 \cdot 0,0000001^2} = 0,7 \mu m$$

Svi rezultati mjerenja prikazani u Tablici 7 izračunati su kao aritmetička sredina od tri ponovljena mjerenja.

Tablica 7. Usporedba rezultata mjerenja kontrolnog prstena Ø15,997 mm

Usporedba rezultata mjerenja promjera kontrolnog prstena Ø 15,997 mm					
Metoda	Mjerni alat	Male kontaktne čeljusti	Ticalo		Ticalo
	Referentni etalon	Referentni prsten Ø 13,9991 mm	Referentni prsten Ø 13,9991 mm		Planparalelna granična mjerka 16 mm
Presjek/Visina		Rezultat mjerenja [mm]	Rezultat mjerenja [mm]	E_n	Rezultat mjerenja [mm]
I / 1-1		15,9974	15,9970	0,39	15,9963
I / 2-2		15,9972	15,9969	0,29	15,9964
I / 3-3		15,9971	15,9972	0,10	15,9965
II / 1-1		15,9974	15,9971	0,29	15,9965
II / 2-2		15,9973	15,9971	0,19	15,9964
II / 3-3		15,9973	15,9970	0,29	15,9964
Mjerna nesigurnost U (µm)		0,61	0,83		0,7

Usporedba rezultata je izvršena na način da je kao referentna metoda izabrana metoda s kontaktim čeljustima s obzirom da je ta metoda potvrđena na međunarodnim usporedbama.

Faktor $|E_n|$ mora biti manji od broja 1 kako bi rezultati metoda sa ticalom bili usporedni sa referentnom metodom sa kontaktim čeljustima.

Faktor E_n izračunava se formulom [6]:

$$E_n = \frac{d_{xt} - d_{xk}}{2\sqrt{u(d_{xt})^2 + u(d_{xk})^2}} = E_n = \frac{d_{xt} - d_{xk}}{\sqrt{U(d_{xt})^2 + U(d_{xk})^2}} < 1 \quad (53)$$

gdje je:

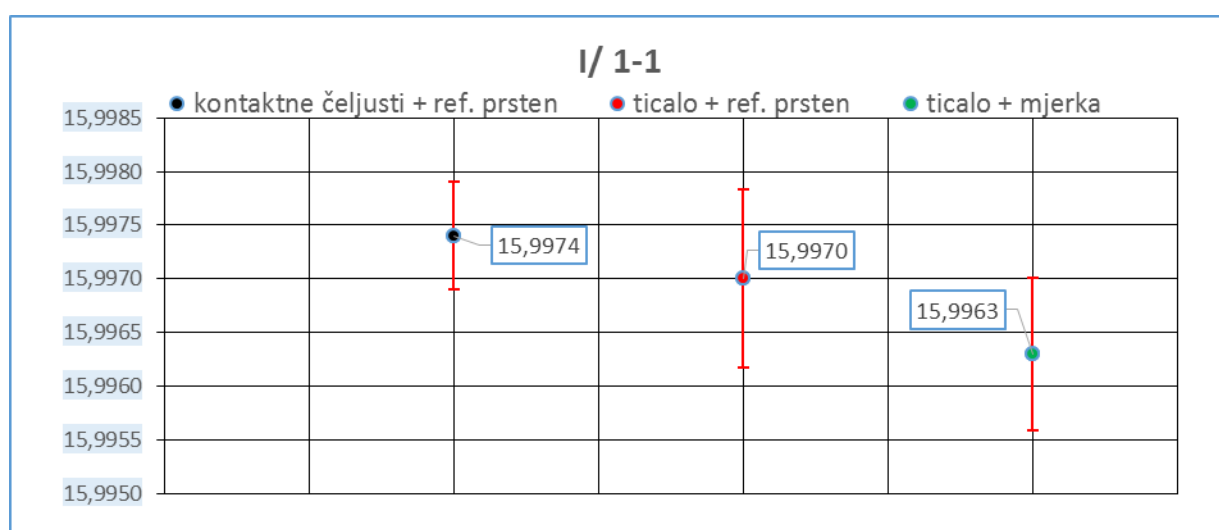
$d_{xt,i}$ promjer kontrolnog prstena izmjeren odgovarajućom metodom sa ticalom

$d_{xk,i}$ promjer kontrolnog prstena izmjeren metodom sa kontaktnim čeljustima

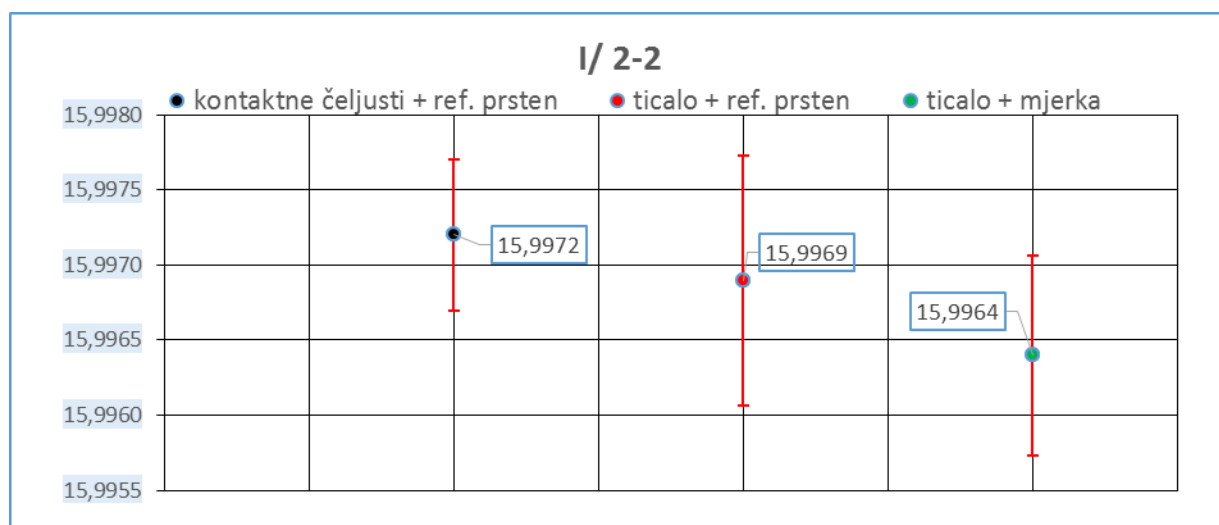
$U(d_{xt})$ mjerna nesigurnost metode sa ticalom

$U(d_{xk})$ mjerna nesigurnost metode sa kontaktnim čeljustima

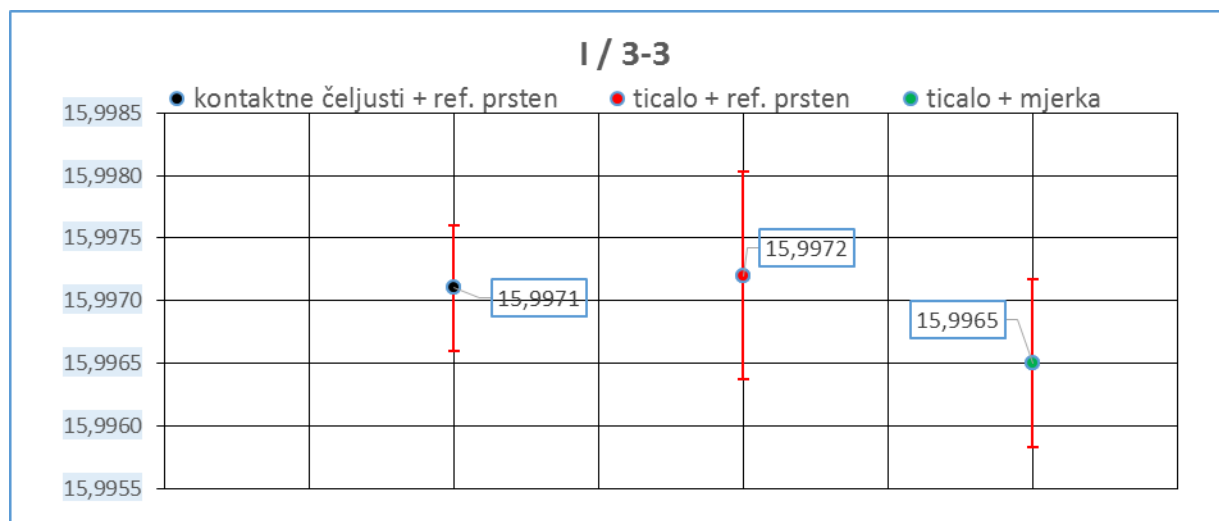
U daljnjem tekstu prikazat će se usporedba rezultata metoda kroz dijagrame po presjecima i razinama kontrolnog prstena $\varnothing 15,997$ mm.



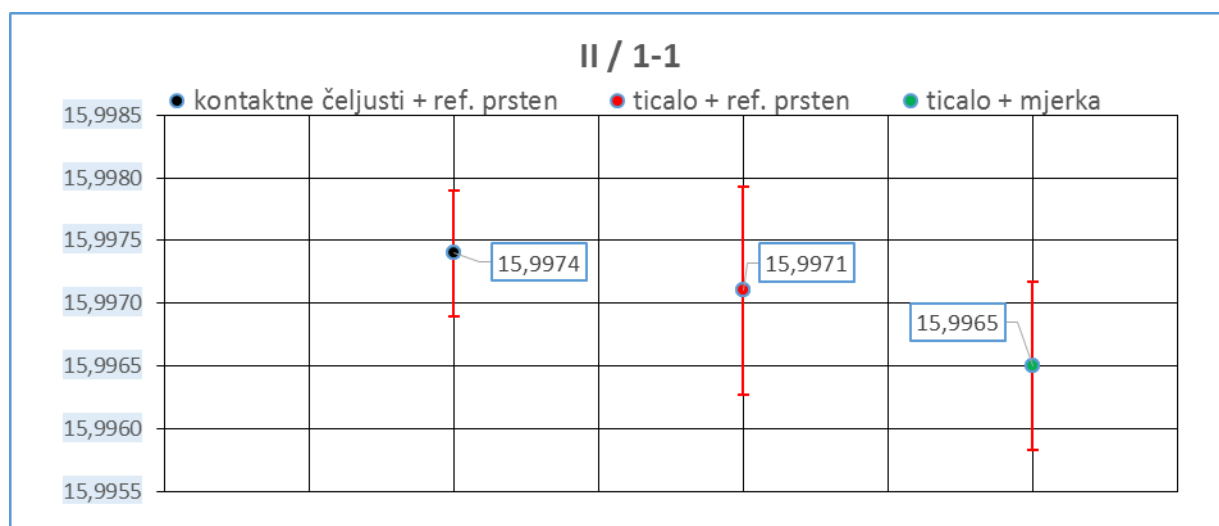
Slika 57. Dijagram Presjek I / Razina 1-1



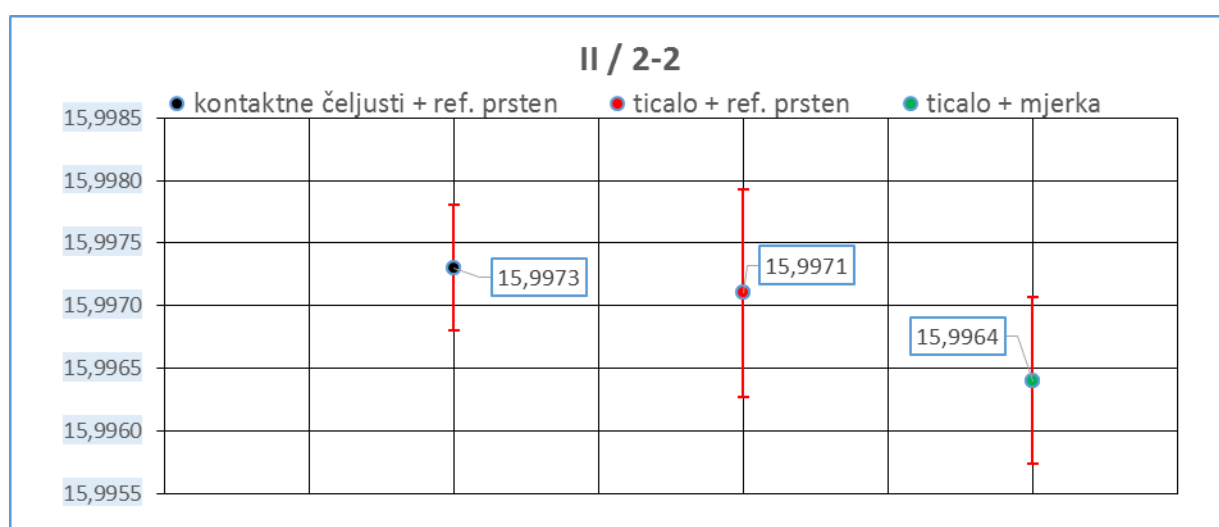
Slika 58. Dijagram Presjek I / Razina 2-2



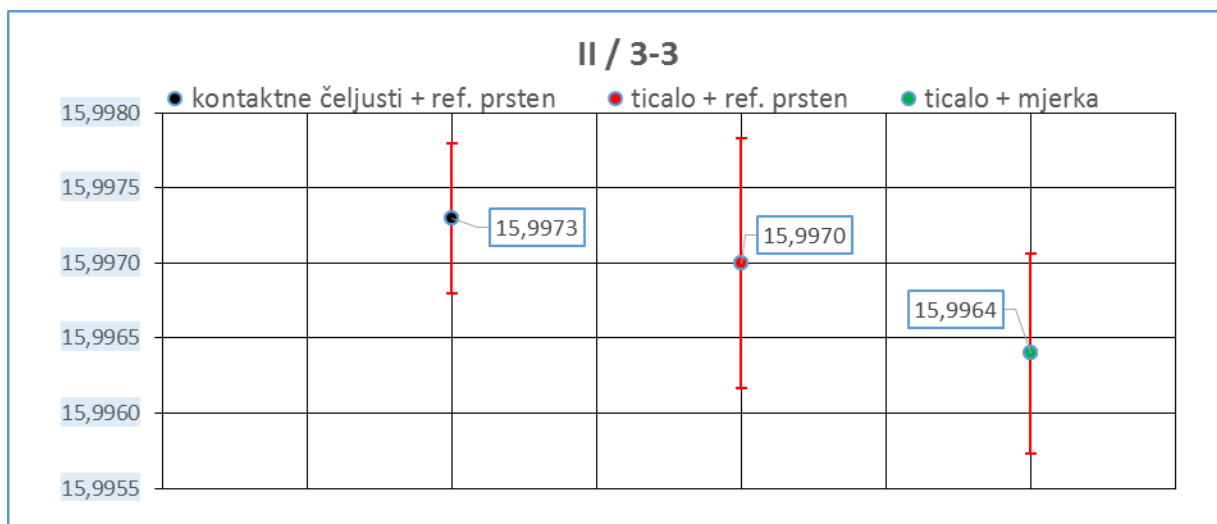
Slika 59. Dijagram Presjek I / Razina 3-3



Slika 60. Dijagram Presjek II / Razina 1-1



Slika 61. Dijagram Presjek II / Razina 2-2



Slika 62. Dijagram Presjek II / Razina 3-3

4 Zaključak

U ovom diplomskom radu detaljno je opisano mjerenje duljine unutarnjeg promjera prstena na univerzalnom uređaju za mjerenje duljine DMS 680 koji se nalazi u Nacionalniom laboratoriju za duljinu. Osim opisa mjerenja duljine unutarnjeg promjera prstena klasičnom metodom pomoću kontaktnih čeljusti, opisana je metoda mjerenja pomoću ticala te nova metoda mjerenja pomoću ticala i planparalelene granične mjerke koja je razvijena u sklopu ovog rada.

Metodom ticala i planparalelene granične mjerke uklonjeni su glavni nedostaci metode sa kontaktnim čeljustima i metode sa ticalom i referentnim prstenom. Točnije metodom mjerenja ticalom koja za referentni etalon koristi planparalelnu graničnu mjerku mogu se mjeriti unutarnji promjeri prstena manji od 8 mm te je sljedivost rezultata osigurana preko planparalelnih graničnih mjerki. Na ovaj način Laboratoriji nema potrebu za umjeravanje etalonskih prstena koristiti usluge vanjskih mjeriteljskih laboratorija.

U eksperimentalnom dijelu rada, postavio se sustav s okretnim stolom kako bi se omogućio ispravno postavljanje planparalelene granične mjerke u smjeru mjerne osi uređaja. Dodatno, postavljenja su ograničenja do koje je razine potrebno provoditi niveliranje kako bi se umanjio doprinos zbog nepodešenosti mjerke s mjernim uređajem na nesigurnost rezultata mjerenja promjera kontrolnog prstena. U sklopu rada provedena su mjerenja kontrolnog prstena nazivne dimenzije $\varnothing 15,997$ mm klasičnom metodom - metodom s mjernim čeljustima, metodom s ticalom gdje se kao referentna mjera koristio referentni prsten, te metodom s ticalom gdje se kao referentna mjera koristila planparalelna granična mjerka.

Kontrolni prsten mjerio se u dva presjeka na tri različite visine sa svim spomenutim metodama. Mjerne nesigurnosti procijenjene su za metodu s ticalom za oba načina postavljanja referentne vrijednosti. Završno, provedena je usporedba rezultata mjerenja i mjernih nesigurnosti obje metode sa ticalom s metodom s mjernim čeljustima. Izračunate su E_n vrijednosti gdje je kao referentna metoda odabrana metoda s mjernim čeljustima s obzirom da su rezultati mjerenja dobiveni ovom metodom dokazani brojnim međulaboratorijskim usporedbama. Provedenom usporedbom ovih metoda može se zaključiti da je metoda s ticalom kad se kao referenca koristi referentni prsten potpuno usporediva s metodom s mjernim čeljustima (sve vrijednosti E_n vrijednosti manje su od 1) dok, ako se kao referenca koristi planparalelna granična mjerka jedna od šest vrijednosti E_n veća je od 1. Iako su rezultati zadovoljavajući što je prikazano u Tablici 7. i na dijagramima na Slikama 57. do 62.

E_n vrijednosti bliske 1 ukazuju da bi bilo potrebno provesti dodatno istraživanje utjecaja na mjerni rezultat dobiven metodom s ticalom (s planparalelnom graničnom mjerkom) kako bi se izvršila bolja procjena mjernih nesigurnosti.

5 Literatura

- [1] Matej Polak; Završni rad: “Usporedba rezultata mjerenja unutarnjih promjera ostvarenih različitim ručnim mjerilima duljine“, FSB, 2012.
- [2] BIPM *Calibration and Measurement Capabilities*
- [3] *Instruction book* DMS 680
- [4] LFSB L 090: Postupak za umjeravanje kontrolnih prstena i graničnih mjerila za osovinu, Izdanje 03
- [5] JCGM 100:2008 Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti
- [6] Vedran Mudronja, Vedran Šimunović: *Final Report EURAMET.L-S21 Supplementary comparison of Parallel Thread Gauges*

6 Prilog

PRILOG I. Certifikati o umjeravanju

PRILOG II. Ispunjene *Radne podloge LFSB-WR 290* za sve tri metode.

POTVRDA O UMJERAVANJU br. 0399/16

Certificate of Calibration No.

17025-HAA



Datum izdavanja: 20.04.2016.
Date of issue

Korisnik: FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Receiver NACIONALNI LABORATORIJ ZA DULJINU, ZAGREB

Podnositelj zahtjeva: -
Customer

Broj zahtjeva i datum: -
Application No. and date

Predmet umjeravanja: UNIVERZALNI UREĐAJ ZA MJERENJE DULJINA
Measurement object 1D measuring device

Mjerno područje: 0 - 600 mm / 0,00001 mm
Measuring range

Proizvođač: JOINT INSTRUMENTS
Manufacturer

Vrsta: DMS 680
Type

Serijski broj / Oznaka: 324 / MU 44-421
Serial no. / Code

Datum mjerenja: 13. - 17.04.2016.
Date of measurements

Mjerne nesigurnosti navedene u ovom dokumentu određene su sukladno ISO/IEC Guide 98-3 i EA-4/02. Mjerne nesigurnosti su procijenjene kao proširene nesigurnosti dobivene množenjem standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja k , koji odgovara razini povjerenja od oko 95 %. Uobičajeno, faktor k iznosi 2.

Ova potvrda ne može se obnoviti djelomično, osim uz pismeno odobrenje Laboratorija koji ju je izdao.

Napomena: Ovoj potvrdi pridružena je naljepnica na kojoj se broj 3 odnosi na laboratorij HMI/FSB-LPMD sukladno organizacijskoj shemi HMI-a.

The measurement uncertainties stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98-3 and EA-4/02. Usually, they have been estimated as expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k corresponding to a confidence level of about 95 %. Normally, this factor k is 2.

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing Laboratory.

Note: This certificate is associated with a label on which the number 3 refers to the laboratory HMI/FSB-LPMD according to the HMI organizational chart.

Voditelj Laboratorija:
Head of Laboratory:

Dr.sc. Gorana Barišić

Potvrda o umjeravanju br. 0399/16
Certificate of Calibration No.

Strana 2 od 3
Page 2 of 3

Mjerni postupak

Rezultati mjerenja iskazani u ovoj Potvrdi dobiveni su temeljem postupka LFSB L 430 (izdanje 03): *Postupak za umjeravanje 1D mjernog uređaja*.

Measuring procedure

The measurement results reported in this Certificate were obtained following procedure LFSB L 430 (issue 03): *Procedure for calibration of 1D measuring device*.

Sljedivost

Sljedivost je osigurana referentnim etalom:
1. Planparalelne granične mjerke MAHR, oznaka GMD 14-359,
Potvrda o umjeravanju br. 1420/2, DMDM.

Traceability

Traceability is ensured through reference standard:
1. Gauge blocks set MAHR, mark GMD 14-359,
Certificate of calibration No. 1420/2, DMDM.

Uvjeti okoliša

Mjerenja su izvršena pri temperaturi okoliša $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

Environment Conditions

Measurements were performed at ambient temperature $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

Nesigurnost rezultata mjerenja

$U = (0,2 + 3,8L) \mu\text{m}$, L u m

Uncertainty of measurement results

$U = (0,2 + 3,8L) \mu\text{m}$, L in m

Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja dani su u Tablici 1 i 2.

Measurement results

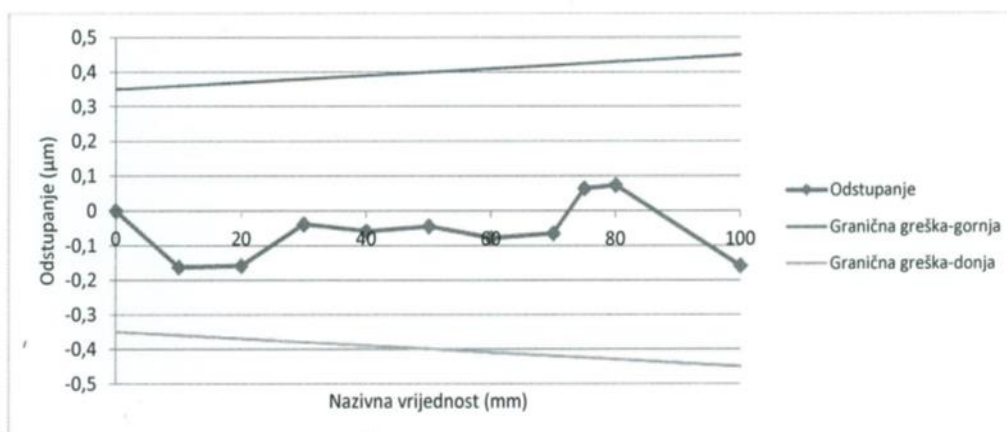
Measurement results are presented in Tables 1 and 2.

Potvrda o umjeravanju br. 0399/16
Certificate of Calibration No.

Strana 3 od 3
Page 3 of 3

Tablica 1. Rezultati mjerenja pogreške uređaja

Vrijednost na uređaju, mm	Izmjereno mm	Odstupanje μm	Granična pogreška μm
10	9,99984	-0,16	$\pm 0,36$
20	19,99984	-0,16	$\pm 0,37$
30	29,99996	-0,04	$\pm 0,38$
40	39,99994	-0,06	$\pm 0,39$
50	49,99996	-0,04	$\pm 0,40$
60	59,99992	-0,08	$\pm 0,41$
70	69,99994	-0,06	$\pm 0,42$
75	75,00006	+0,06	$\pm 0,43$
80	80,00007	+0,07	$\pm 0,44$
100	99,99984	-0,16	$\pm 0,45$



Tablica 1. Rezultati mjerenja ponovljivosti uređaja

Ponovljivost, μm	Mjerna nesigurnost, μm
0,16	0,2

Mjerio:
Measured by
Josip Smoljić
Josip Smoljić, ing.

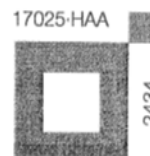
Provjerio:
Checked by

Dr.sc. Vedran Šimunović

LFSB-MR 010-1

POTVRDA O UMJERAVANJU br. 0192 - 0210/15

Certificate of Calibration No.



Datum izdavanja: 05.03.2015.
Date of issue

Korisnik: LFSB - ZAGREB
Receiver

Podnositelj zahtjeva: -
Customer

Broj zahtjeva i datum: -
Application No. and date

Predmet umjeravanja: KONTROLNI PRSTEN
Measurement object Setting ring

Mjerno područje: Ø8 - 15 mm
Measuring range

Proizvođač: Vidi Tablicu 1
Manufacturer

Vrsta: -
Type

Serijski broj / Oznaka: Vidi Tablicu 1
Serial no. / Code

Datum mjerenja: siječanj, 2015.
Date of measurements

Mjerne nesigurnosti navedene u ovom dokumentu određene su sukladno ISO/IEC Guide 98-3 i EA-4/02. Mjerne nesigurnosti su procijenjene kao proširene nesigurnosti dobivene množenjem standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja k , koji odgovara razini povjerenja od oko 95 %. Uobičajeno, faktor k iznosi 2.

Ova potvrda ne može se obnoviti djelomično, osim uz pismeno odobrenje Laboratorija koji ju je izdao. Napomena: Ovoj potvrdi pridružena je naljepnica na kojoj se broj 3 odnosi na laboratorij HMI/FSB-LPMD sukladno organizacijskoj shemi HMI-a.

The measurement uncertainties stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98-3 and EA-4/02. Usually, they have been estimated as expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k corresponding to a confidence level of about 95 %. Normally, this factor k is 2.

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing Laboratory.

Note: This certificate is associated with a label on which the number 3 refers to the laboratory HMI/FSB-LPMD according to the HMI organizational chart.

Voditelj Laboratorija:
Head of Laboratory:

Dr. sc. Gorana Baršić



This certificate is consistent with the calibration and measurement capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>).

Ovaj certifikat je u skladu sa sposobnostima umjeravanja i mjerenja (CMCs) koje su navedene u Dodatku C Sporazuma o uzajamnom priznavanju (MRA) sastavljenog od strane Međunarodnog odbora za utege i mjere (CIPM). Svi instituti potpisnici MRA međusobno priznaju valjanost certifikata umjeravanja i mjerenja za veličine, mjerna područja i mjerne nesigurnosti navedene u Dodatku C (za detalje pogledati <http://www.bipm.org>).

Potvrda o umjeravanju br. 0192 - 0210/15
Certificate of Calibration No.

Strana 2 od 3
Page 2 of 3

Mjerni postupak

Rezultati mjerenja iskazani u ovoj Potvrdi dobiveni su temeljem postupka LFSB L 090 (izdanje 03): *Postupak za umjeravanje kontrolnih prstenova i graničnih mjerila za osovinu.*

Measuring procedure

The measurement results reported in this Certificate were obtained following procedure LFSB L 090 (issue 03): Procedure for calibration of setting rings and GO / NO GO rings.

Sljedivost

Sljedivost je osigurana referentnim etalonom:

1. Planparalelne granične mjerke MAHR, oznaka GMD 14-359, *Potvrda o umjeravanju br. 12-0399-01, I.N.R.I.M. – Torino,*
2. Referentni prsten Ø13,9983 mm JOINT, oznaka RET 179-424, *Potvrda o umjeravanju br. 50501 PTB14, PTB – Braunschweig,*
3. Referentni prsten Ø50,0004 mm JOINT, oznaka RET 180-425, *Potvrda o umjeravanju br. 50502 PTB14, PTB – Braunschweig.*

Traceability

Traceability is ensured through reference standard:

1. Gauge blocks set MAHR, mark GMD 14-359, *Certificate of calibration No. 12-0399-01, I.N.R.I.M. – Torino,*
2. Reference ring Ø13,9983 mm JOINT, mark RET 179-424, *Certificate of calibration No. 50501 PTB14, PTB – Braunschweig,*
3. Reference ring Ø50,0004 mm JOINT, mark RET 180-425, *Certificate of calibration No. 50502 PTB14, PTB – Braunschweig.*

Uvjeti okoliša

Mjerenja su izvršena pri temperaturi okoliša ($20 \pm 0,5$) °C. Izmjerene razlike temperatura referentnog i umjerenog prstena nisu prelazile 0,1 °C.

Environment Conditions

Measurements were performed at ambient temperature ($20 \pm 0,5$) °C. Measured differences in the temperature of the reference and calibrated ring did not exceed 0,1 °C.

Nesigurnost rezultata mjerenja

$$U = (0,6 + 0,7D) \mu\text{m}, D \text{ u m}, k=2$$

Uncertainty of measurement results

$$U = (0,6 + 0,7D) \mu\text{m}, D \text{ in m}, k=2$$

Rezultati mjerenja

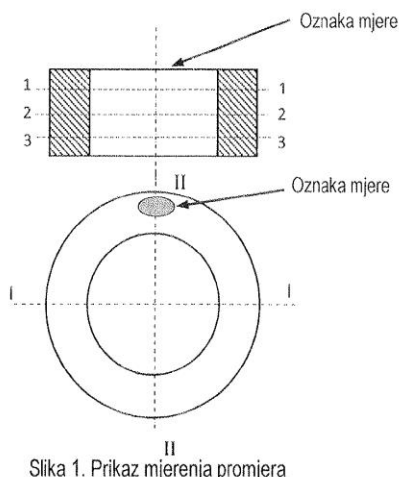
Rezultati mjerenja dani su u Tablici 1.

Measurement results

Measurement results are presented in Table 1.

Potvrda o umjeravanju br. 0192 - 0210/15
Certificate of Calibration No.

Strana 3 od 3
Page 3 of 3



Slika 1. Prikaz mjerenja promjera

Tablica 1. Rezultati mjerenja

Table 1. Measurement results

Oznaka prstena	Nazivni promjer, mm	Proizvođač	Izmjereno, mm		Naljepnica br.
			Presjek I - I	Presjek II - II	
RET 112-219	8,000	-	8,0010	8,0005	0192
RET 157-382	8,000	MCM	7,9988	7,9991	0193
RET 158-383	8,500	MCM	8,4989	8,4995	0194
RET 159-384	9,001	MCM	9,0002	9,0002	0195
RET 160-385	9,500	MCM	9,4982	9,4980	0196
RET 142-367	9,997	TESA	9,9976	9,9974	0197
RET 85-165	9,999	PPT	9,9989	10,0002	0198
RET 161-386	10,001	MCM	10,0009	10,0012	0199
RET 186-463	10,500	MG	10,4993	10,4995	0200
RET 144-369	10,996	TESA	10,9972	10,9971	0201
RET 162-387	11,000	MCM	10,9981	10,9977	0202
RET 187-464	11,500	MG	11,4996	11,4996	0203
RET 163-388	12 -0,001	MCM	11,9974	11,9972	0204
RET 164-389	13,000	MCM	12,9985	12,9982	0205
RET 102-209	13,040	-	13,0383	13,0387	0206
RET 103-210	13,060	-	13,0573	13,0577	0207
RET 117-224	14 -0,0008	ZEISS	13,9991	14,0000	0325
RET 165-390	14,000	MCM	14,0012	14,0010	0208
RET 86-166	14,995	PPT	14,9996	15,0003	0209
RET 166-391	15,000	MCM	14,9999	15,0000	0210

Mjorio:
Measured by
Josip Smoljić
Josip Smoljić, Ing.

Provjerio:
Checked by

Dr.sc. Vedran Šimunović

POTVRDA O UMJERAVANJU br. 0091/16

Certificate of Calibration No.

17025-HAA



Datum izdavanja: 10.02.2016.
Date of issue

Korisnik: FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Receiver NACIONALNI LABORATORIJ ZA DULJINU, ZAGREB

Podnositelj zahtjeva: -
Customer

Broj zahtjeva i datum: -
Application No. and date

Predmet umjeravanja: PLANPARALELNE GRANIČNE MJERKE
Measurement object Gauge blocks set

Mjerno područje: (0,5 - 100) mm
Measuring range

Proizvođač: CEJ
Manufacturer

Vrsta: 00
Type

Serijski broj / Oznaka: 840074 / GMD 8-231
Serial no. / Code

Datum mjerenja: 14.01. - 04.02.2016.
Date of measurements

Mjerne nesigurnosti navedene u ovom dokumentu određene su sukladno ISO/IEC Guide 98-3 i EA-4/02. Mjerne nesigurnosti su procijenjene kao proširene nesigurnosti dobivene množenjem standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja k , koji odgovara razini povjerenja od oko 95 %. Uobičajeno, faktor k iznosi 2.

Ova potvrda ne može se obnoviti djelomično, osim uz pismeno odobrenje Laboratorija koji ju je izdao.

Napomena: Ovoj potvrdi pridružena je naljepnica na kojoj se broj 3 odnosi na laboratorij HMI/FSB-LPMD sukladno organizacijskoj shemi HMI-a.

The measurement uncertainties stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98-3 and EA-4/02. Usually, they have been estimated as expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k corresponding to a confidence level of about 95 %. Normally, this factor k is 2.

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing Laboratory.

Note: This certificate is associated with a label on which the number 3 refers to the laboratory HMI/FSB-LPMD according to the HMI organizational chart.

Voditelj Laboratorija:
Head of Laboratory:

Dr.sc. Gorana Baršić

Potvrda o umjeravanju br. 0091/16
Certificate of Calibration No.

Strana 2 od 5
Page 2 of 5

Mjerni postupak

Rezultati mjerenja iskazani u ovoj Potvrdi dobiveni su temeljem postupka LFSB L 020 (izdanje 10): *Postupak za umjeravanje planparalelnih graničnih mjerki usporedbenom metodom*. Iskazano odstupanje dužine odnosi se na odstupanje u sredini mjerne površine. Promjenljivost dužine je jednaka rasponu izmjerenih dužina u pet točaka.

Measuring procedure

The measurement results reported in this Certificate were obtained following procedure LFSB L 020 (issue 10): *Procedure for calibration of gauge blocks by the method of comparison*. The entered deviation of gauge block length refers to deviation in the center of the measuring surface. Length variation is equal to the range of the measured lengths in five points.

Sljedivost

Sljedivost je osigurana referentnim etalomom:
1. Planparalelne granične mjerke MAHR, oznaka GMD 14-359,
Potvrda o umjeravanju br. 1420/2, DMDM.

Traceability

Traceability is ensured through reference standard:
1. Gauge blocks set MAHR, mark GMD 14-359,
Certificate of calibration No. 1420/2, DMDM.

Uvjeti okoliša

Mjerenja su izvršena pri temperaturi okoliša ($20 \pm 0,5$) °C.

Environment Conditions

Measurements were performed at ambient temperature ($20 \pm 0,5$) °C.

Nesigurnost rezultata mjerenja

$U = (0,05 + 1,1L) \mu\text{m}$, L u m

Uncertainty of measurement results

$U = (0,05 + 1,1L) \mu\text{m}$, L in m

Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja dani su u Tablici 1.

Measurement results

Measurement results are presented in Table 1.

Potvrda o umjeravanju br. 0091/16
Certificate of Calibration No.

Strana 5 od 5
Page 5 of 5

Tablica 1. Rezultati mjerenja dužine i promjenljivosti dužine

Table 1 Results of measuring the length and length variation

Nazivna dužina Nominal length mm	Serijski broj Serial number	Odstupanje dužine Deviations of length μm	Promjenljivost dužine Variations in length μm	Primjedba Remark
11	840074	-0,04	0,06	korodirana
11,5	840074	-0,03	0,06	-
12	840074	-0,09	0,04	-
12,5	840074	-0,01	0,06	-
13	840074	-0,05	0,07	-
13,5	840074	-0,05	0,08	-
14	840074	-0,04	0,08	-
14,5	840074	-0,06	0,07	-
15	840074	-0,06	0,10	-
15,5	840074	-0,02	0,05	-
16	840074	-0,08	0,09	korodirana
16,5	840074	+0,04	0,02	korodirana
17	840074	-0,04	0,08	korodirana
17,5	840074	-0,02	0,04	-
18	840074	-0,05	0,08	-
18,5	840074	-0,06	0,05	-
19	840074	-0,04	0,03	-
19,5	840074	-0,04	0,06	-
20	840074	-0,05	0,13	-
20,5	840074	-0,07	0,04	-
21	840074	-0,02	0,02	-
21,5	840074	-0,02	0,08	-
22	840074	-0,04	0,06	-
22,5	840074	-0,06	0,07	-
23	840074	-0,04	0,06	-
23,5	840074	-0,07	0,05	-
24	840074	-0,07	0,11	-
24,5	840074	-0,07	0,09	-
25	840074	-0,06	0,06	-
50	840074	-0,07	0,04	-
75	840074	-0,18	0,05	-
100	840074	-0,33	0,10	-

Napomena: Većina graničnih mjerki je mehanički oštećena.
Note

Mjerio:
Measured by
Josip Smoljić, ing.

Provjerio:
Checked by
Dr.sc. Vedran Šimunović

LFSB-MR 020-1